

Aura Nieminen

ENERGIAN VARASTOINNIN MEKANISMIT JA NIIDEN ENERGIATEHOKKUUS

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Syyskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Aura Nieminen: Energian varastoinnin mekanismit ja niiden energiatehokkuus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikka, TkK
Syyskuu 2019

Energiavarastoja tarvitaan useisiin eri tarpeisiin. Niiden avulla voidaan tehdä energiantuotannosta edullisempaa, vastata energian kysynnän vaihteluihin, korjata sähkön laatuvirheitä ja mahdollistaa sähkölaitteiden käyttö jakeluverkon ulottumattomissa. Työssä tarkastellaan energian varastoinnin eri konsepteja. Kunkin konseptin kohdalla käydään läpi energiatehokkuuskysymyksiä sekä olennaisia ympäristö- ja turvallisuustekijöitä ja haasteita.

Energian kysyntä vaihtelee erimittaisissa sykleissä. Siihen vaikuttavat muun muassa ihmisen päivärytmi sekä vuodenaikojen mukana tulevat muutokset ilmastossa. Koska sähköverkon on jatkaisella hetkellä tasattava kulutus ja tuotanto, varaudutaan näihin vaihteluihin energiaravastoin. Suurimittaisia ja pidempiaikaisia energian varastointia varten työssä esitellään kaksi ravastoa: pumppuvoimala ja paineilmaravasto.

Pumppuvoimala perustuu vesivoimalan tavoin veden potentiaalienergiaan. Erona näissä on, että pumppuvoimala ei nimestään huolimatta tuota energiaa, vaan ainoastaan ravastoi sitä. Pumppun energia on peräisin sähköverkosta, eikä sitä ole välttämättä tuotettu vesivoimalla. Vesivoimalasta poiketen veden ei anneta virrata pois sen pyöritettyään turbiinia, vaan se pumpataan edullisen energiantuotannon aikana takaisin ylemmään vesisäiliöön.

Paineilmaravasto ravastoi energiaa paineistettuun ilmaan. Edullisen energiantuotannon aikana paineilmaravaston kompressorit puristavat ilman suureen paineeseen ja säilövät sen usein maanalaississa suolaesiintymisissä. Kun energia halutaan käyttöön, lämmitetään se hyötysuhteen parantamiseksi ja annetaan virrata generaattoria pyörittäviin turbiineihin.

Lyhytaikaiset ravastot ravastoivat pienemmän määrän energiaa ja voivat muun muassa stabiloida verkkoa, parantaa sähkön laatua ja olla lyhytaikainen hätävararatkaisu pääasiallisen jännitelähteen häiriytyessä. Työssä esitellään energian lyhytaikaisina ravastoina akku, kondensaattori, sähkömagneettinen energiaravasto, vetyravastointi ja vauhtipyörä.

Akut ravastoivat energian sähkökemiallisesti kahden elektrodin väliin. Akun elinikäen, purkautumisnopeuden, latauskertojen määrän ja ympäristöhaittoihin vaikuttavat elektrodien sekä elektrolyytin materiaali. Yleisimmät akkutyyppejä ovat lyijyakut, nikkeli-kadmiumakut ja litiumakut.

Kondensaattori koostuu myös kahdesta elektrodista. Se varaa energiaa elektrodien välille muodostuneeseen sähkökenttään. Tavallisten kondensaattorien ravastointikapasiteetti on pieni, johon ratkaisuna on kehitetty superkondensaattoreita. Ne tarjoavat tulevaisuudessa ratkaisuja muun muassa autoteollisuuteen.

Suprajohtava sähkömagneettinen sähköravasto perustuu materiaalin kykyyn muuttua suprajohtavaksi kryogeenisessä lämpötilassa. Suprajohtavassa tilassa materiaalin resistanssi häviää, ja tätä voidaan hyödyntää energian varastoinnissa laittamalla sähkövirta kiertämään suljettuun piiriin varastoinnin ajaksi. Koska resistanssin aiheuttamia häviöitä ei synny, lähes yhtä suuri määrä energiaa voidaan ottaa piiristä käyttöön, kun sille on tarve.

Vetyravastointi vaatii ensin vedyn luomisen eli irrottamisen yhdisteestä. Vety voidaan irrottaa muun muassa vedestä, maakaasusta tai biomassasta. Irrotettu vety ravastoidaan joko paineistettuna kaasuna, nesteytettynä tai hydridin muodossa. Vedyn irrottamiseen investoitu energia saadaan käyttöön esimerkiksi polttokennojen avulla, jotka ovat vedyn tuotantotavasta riippuen hiilivapaa ratkaisu fossiilisille polttoaineille.

Vauhtipyörä ravastoi sähköverkosta ottamansa energian pyörimisenergiaan. Sen toiminta määräytyy hitausmomentin perusteella. Mitä suurempi vauhtipyörän hitausmomentti on, sitä enemmän se vastustaa muutosta liike-energiassa ja sitä enemmän se pystyy ravastoimaan energiaa liikkeeseen. Ideaalisesti vauhtipyörä on kevyt, mutta kestävä.

Avainsanat: energiaravasto, pumppuvoimala, paineilmaravasto, akku, superkondensaattori, SMES, polttokenno, vauhtipyörä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TAUSTAA ENERGIAVARASTOISTA.....	3
3. PITKÄAIKAISVARASTOT	7
3.1 Pumppuvoimalaitos	7
3.2 Paineilmavarasto	10
3.3 Case-esimerkit.....	13
4. LYHYTAIKAISVARASTOT	16
4.1 Akut ja paristot.....	16
4.2 Kondensaattorit	20
4.3 Sähkömagneettinen energiavarasto	22
4.4 Vetyvarastointi ja polttokennot	25
4.5 Vauhtipyörä	29
5. YHTEENVETO.....	33
LÄHTEET	34

1. JOHDANTO

Vuonna 2018 maailmanlaajuinen energiankysyntä kasvoi 2,8 %. Ilmiötä selittävät muun muassa tietyillä alueilla voimistuneet tarpeet lämmitykselle ja jäähdytykselle. Samana vuonna merkityksellisimmän energiamuodon, sähköenergian, maailmanlaajuinen tarve kasvoi 4%. [1] Väestönkasvun sekä taloudellisen kehittymisen myötä lisääntyvän energiankysynnän trendi on havaittavissa myös pidemmällä aikajänteellä [2]. Kasvava energiatarve teknologisoituneessa maailmassa merkitsee voimistuvaa riippuvuutta keskeyttämättömästä ja luotettavasta sähkön jakelusta [3].

Sähköenergian kysyntään vastaamisesta ja sähköverkon luotettavasta toiminnasta tekee haasteellista kysynnän ja tuotannon vaihtelu ajan suhteen [4, s. 7]. Sähköverkon tulee tasapainottaa sähkön kysyntä ja tarjonta reaaliajassa. Kulutusta ja tuotantoa voidaan yhteensovittaa jakelujärjestelmillä, joiden avulla jokahetkiseen kulutustarpeeseen voidaan vastata. Nämä järjestelmät ovat kuitenkin kalliita ja teknillisesti haastavia toteuttaa. [4, s. 5] Kulutukseen voidaan lisäksi vaikuttaa progressiivisella tai aikaan sidotulla energian hinnoittelulla [3; 4, s. 5]. Tässä työssä tarkastellaan usein hinnoittelun kanssa yhdessä sovellettavaa, kolmatta keinoa: energian varastointia. Energian varastoinnissa kulutuksen ja tuotannon rytmiä ei pyritä muuttamaan, vaan suuren tuotannon aikana syntynyt ylimääräinen energia säilytetään myöhempää käyttöä varten.

Energiavarastot eroavat muun muassa varastointiajoiltaan, täyttö- ja purkaustavoiltaan ja käyttökohteiltaan. Energiavarastot voidaan luokitella myös sen mukaan, missä muodossa niihin varastoitava energia on. Tässä työssä käsitellään yleisimpiä energian varastoinnin mekanismeja keskittyen niiden energiatehokkuuteen liittyviin kysymyksiin. Energiatehokkuuteen vaikuttavat muun muassa varastoinnissa tapahtuvat häviöt sekä energiamäärä, jonka varastointiprosessi vaatii toimiakseen. Energiavarastoihin ja niiden rakentamiseen liittyvät yhteiskunnalliset kysymykset sekä ympäristö- ja turvallisuuskysymykset käsitellään pintapuolisesti. Työssä ei käsitellä lämpöenergian varastointia eikä käyttäjäkohtaisia energiavarastoinnin keinoja, kuten lämminvesivaraajia.

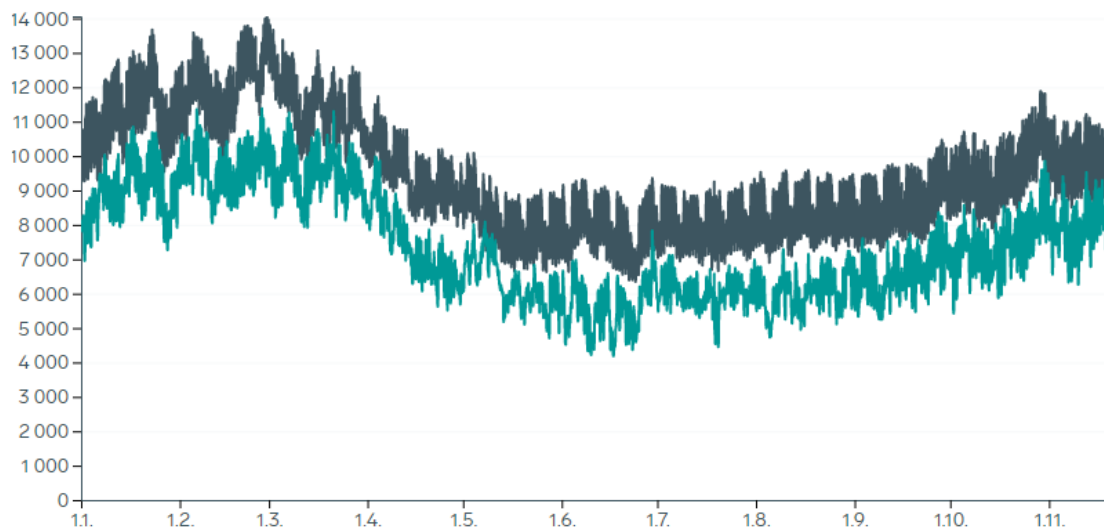
Luvussa 2 käsitellään sähkön kysynnän ja tuotannon eroja ja tarkastellaan, mistä tarve energian varastoinnille syntyy. Luvussa käydään lisäksi läpi varastointiprosessille tyypillisiä piirteitä. Luvussa 3 käsitellään energian pitkäaikaisvarastoja ja esitellään vaihtoehtoisiksi pumppuvoimalaitokset ja paineilmaparastot. Lopuksi tarkastellaan mainittujen

konseptien kustannuskysymyksiä case-esimerkkien avulla. Luku 4 käsittelee energian lyhytaikaisvarastointia. Aluksi käydään läpi sähkökemialliseen varastointiin perustuvat akut ja paristot. Toisena ja kolmantena lyhytaikaisvarastona esitellään sähköenergian sellaisenaan varastoivat kondensaattorit sekä suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto. Seuraavaksi esitellään vetyvarastointi ja siihen integroituna polttokennot. Lopuksi käsitellään energian varastoiminen vauhtipyörien liike-energiaan. Työn lopusta löytyy yhteenveto kaikista esitellyistä energian varastoinnin konsepteista.

2. TAUSTAA ENERGIAVARASTOISTA

Energian kysyntä vaihtelee useissa eripituisissa sykleissä [4, s. 5]. Vuodenaikojen vaihtelu ilmenee energian kysynnässä muun muassa kiinteistöjen lämmitystarpeiden myötä. Vuodenaikojen merkitys energian kysyntään on suurin kotitalouksissa ja pienin teollisuussektorilla, jossa lämmityksen tai ilmastoinnin osuus kaikesta energiankäytöstä on pienin. [5]

Kuva 1 esittää sähkön kulutusta (tummansininen) ja sen tuotantoa (vaaleansininen) Suomessa vuonna 2018. Sähkön kokonaiskäyttö Suomessa vuonna 2018 oli 87 TWh, josta 47 %:n osuus koostui teollisuuskäytöstä, 50 % muusta käytöstä ja 3 % häviöistä. Netton tuonnin osuus vuonna 2018 oli 23 %. [6] Kuvasta 1 on havaittavissa, että kulutus on suurimmillaan vuoden ensimmäisinä kuukausina ja pienimmillään kesällä. Suomen pohjoinen sijainti vaikuttaa lämmitykseen kuluvaan energian osuuteen, jolloin vuodenaikojen merkitys sähkön kulutuksessa korostuu.

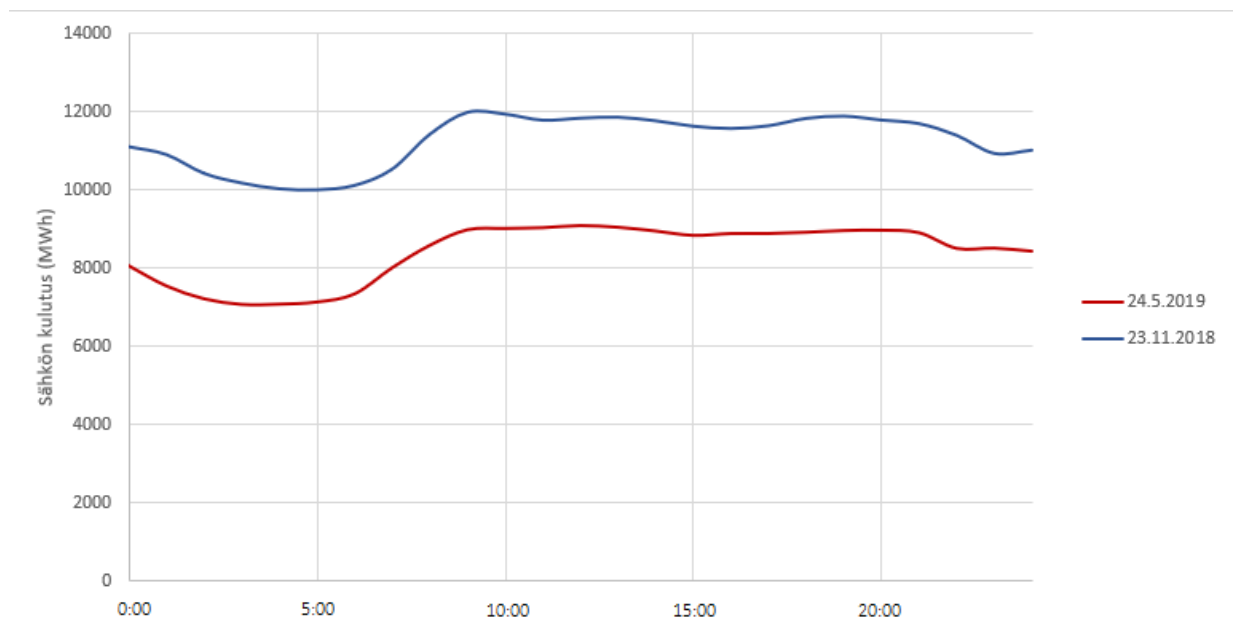


Kuva 1 Sähkön kulutus ja tuotanto Suomessa megawattitunteina vuonna 2018 [7]

Vuodenaikojen lisäksi energian kulutus vaihtelee vuorokauden sisällä. Vuorokauden sisäisen energian kulutuksen vaihteluun vaikuttavat ihmisten päivittäiset aktiviteetit. Kuva 2 esittää sähköenergian kulutusta Suomessa marraskuisena sekä toukokuuisena päivänä. Kulutusta on mitattu tunnin välein. Vuodenajasta riippumatta kuvasta on havaitta-

vissa aamulla energian kysynnän kasvu. Tämä johtuu siitä, että herättyään kuluttajat alkavat käyttää sähkölaitteita ja siirtyvät työpaikoilleen. Kysyntä on vähäisintä aamuyöllä, jolloin sähkönkäyttö vähenee kotitalouksissa ja esimerkiksi julkisten tilojen ilmanvaihto pysähtyy. [8]

Koska myös viikonpäivä vaikuttaa sähkön kysyntään, ovat kuvassa 2 esitetyt päivät molemmat perjantaipäiviä. Viikonloppuisin aamuinen kysynnän piikki siirtyy myöhemmäksi ja loivenee.



Kuva 2 Sähkön kulutus Suomessa 23.11.2018 ja 24.5.2019 [9]

Sen sijaan, että energiaa tuotettaisiin kysynnän piikkejä mukaillen, se pyritään tuottamaan mahdollisimman tasaisesti. Mitä tasaisemmin energiantuotantoon käytettyä koneistoa kuormitetaan, sitä tehokkaammin ja edullisemmin energiaa saadaan tuotettua [4, s. 7]. Pitkien käynnistysaikojensa ja joustamattomuutensa vuoksi esimerkiksi ydinvoimaloilla tuotetaan sähköä tasaisesti kellon- tai vuorokaudenajasta riippumatta. Koska energiatarve on suurempi päivällä kuin yöllä, yöllä generoitua sähköenergiaa varastoidaan ja myydään kysynnän huipputunteina korotettuun hintaan. [10, s. 3]

Tasaisen tuotannon mahdollistamisen lisäksi varastoja käytetään energialähteiden epätasaisuuden saatavuuden vuoksi. Esimerkiksi tuulienergian saatavuus vaihtelee ja sen

määrä riippuu vuodenajasta [11] sekä voimalan maantieteellisestä sijainnista [12]. Tuulivoiman hyödyntämisen mahdollistavatkin erilaiset energiavarastot. Varastojen merkitys siis kasvaa, mitä enemmän joustamattomia tuotantoja on verkkoon kytkettynä [13].

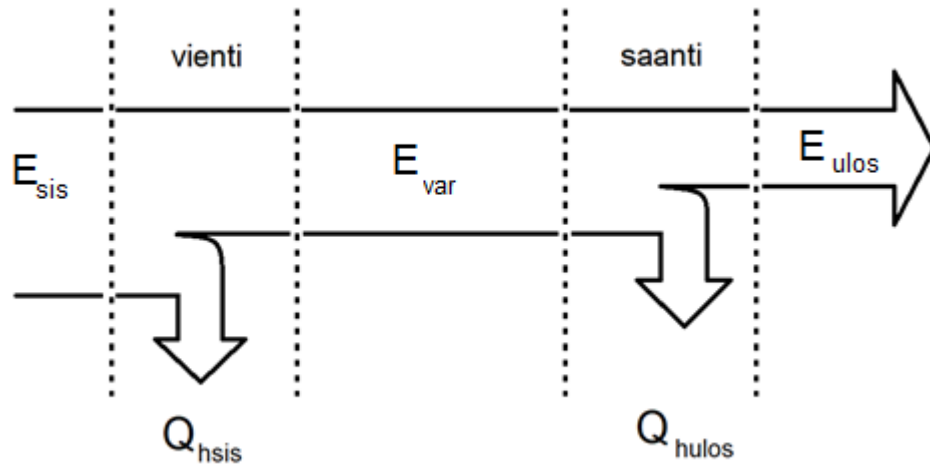
Sen sijaan, että tuulivoimala ja tuulen mekaanista energiaa hyödyntävä pumppu sijoitettaisiin yhteen, on järkevämpää sijoittaa tuulivoimala tuuliolosuhteiltaan otolliselle alueelle ja pumppuvoimala vedenjakelultaan otolliselle alueelle. Tämä on mahdollista muuttamalla tuulienergia tuulivoimalassa ensin sähköenergiaksi ja kuljettamalla se sitten sähköverkkoa pitkin toisaalla sijaitsevaan pumppuvoimalaan. [14, s. 67]

Toinen tuulivoimaloiden yhteyteen tyypillisesti integroitu energiavarasto on akusto. Akustoa hyödyntäviä tuulivoimaloita ovat esimerkiksi Alankomaissa sijaitseva Princess Alexia -tuulipuisto sekä Färösaarilla sijaitseva Husahagin tuulipuisto [15, 16].

Pitkäaikaisten varastojen lisäksi on olemassa aikajänteeltään noin sekunneista minuutteihin käytettäviä lyhytaikaisia varastoja. Nämä lyhytaikaisvarastot ovat keino sähkön laatuun liittyvien ongelmien ratkaisemiseksi. Sähköverkolla kestää palautua täyteen tehoonsa verkossa tapahtuvien lyhyiden keskeytyksien jälkeen. Lyhytaikaisvarastojen avulla verkossa tapahtuvien häiriöiden vaikutukset saadaan minimoitua ja siten parannettua verkkojen tehokkuutta. [17]

Energiavarastoille tyypillistä on, että varastosta saadaan vähemmän ja laadultaan huonompaa energiaa verrattuna alun perin varastoitavaan energiaan. Energian väheneminen aiheutuu häviöistä, joita syntyy sekä varastoinnin aikana, että varastoa ladattaessa ja purettaessa. Energian varastointiin liittyy usein myös energiamuodon muuttaminen. Esimerkiksi tuulienergian varastoinnissa generaattori muuntaa ensin potkurien mekaanisen energian sähköenergiaksi, jonka akku muuttaa jälleen täyttyessään kemialliseksi energiaksi. [4, s. 97] Tähän energiamuodon muuntamiseen kuluva aika voi vaihdella prosessin mukaan kymmenistä minuutista sekunnin murto-osiin [10].

Varaston hyvydestä kertovat muun muassa varastointiaika, energian laadun säilyminen, varastoinnin taloudellisuus sekä latauksen ja purkauksen hyötysuhde [4, s.11–15]. Energian varastoinnin yhteydessä hyötysuhteella tarkoitetaan varastosta saadun energian suhdetta varastoon vietyyn energiaan. Mikäli varastoinnin aikana ei tapahdu häviöitä, energian säilyvyyslain mukaisesti varastosta ulos saatu energia on yhtä suuri kuin sinne sisään laitettu energia vähennettynä viennissä ja saannissa tapahtuvilla energiahäviöillä. Tämä esitetään kuvassa 3.



Kuva 3 Varastoinnin energiatase [4, s.14 mukaillen]

Energiavarastoihin liittyy aina turvallisuuteen ja ympäristöön liittyviä näkökulmia. Energiavarasto voi vaikuttaa esimerkiksi ympäristönsä vesistöön, eläimistöön, ilmanlaatuun ja asukkaisiin. Esimerkiksi suuren mittaluokan akkuvarastointi tuo mukanaan materiaaleihin myrkyllisyyteen, hävittämiseen ja kierrättämiseen liittyviä haasteita. Varaston turvallisuuteen puolestaan vaikuttavat muun muassa mahdollisen vikatilanteen luonne ja tapahtumistodennäköisyys sekä varastoinnissa käytettävien materiaalien myrkyllisyys. [18] Kullekin varastointimekanismille ominaisia ympäristö- ja turvallisuusuuhkia käydään tarkemmin läpi luvuissa 3 ja 4.

3. PITKÄAIKAISVARASTOT

Eroa pitkäaikaisten ja lyhytaikaisten energiavarastojen välille ei voida selkeästi tehdä. Pitkäaikaisvarastoilla pyritään yleensä sovittamaan yhteen vaihtelevat energiatarpeet ja edullinen energiantuotanto. Varastoinnin aikajänteet saattavat vaihdella tunneista viikkoihin. [19]

Tässä työssä pitkäaikaisen varastoinnin varastointimekanismeiksi on luokiteltu pumppuvoimalaitos sekä paineilmavarasto. Näiden lisäksi joitain akkuja, kuten sinkki-bromi-akkuja, hyödynnetään energian pitkäaikaiseen varastointiin [18]. Akut ja paristot käydään kokonaisuudessaan läpi luvussa 4.

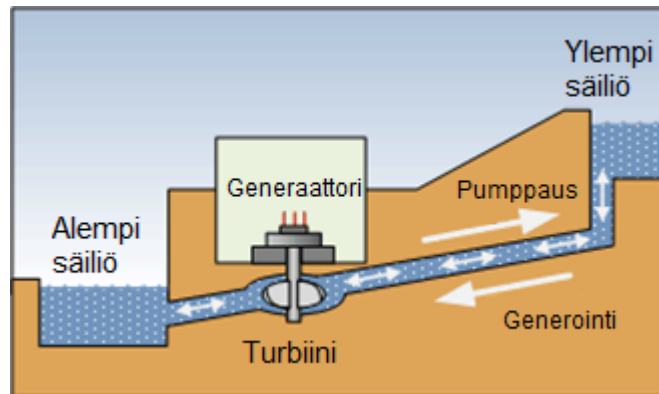
3.1 Pumppuvoimalaitos

Veden potentiaalienergiaan pohjautuva energian varastointi on tuhansia vuosia vanha konsepti, jota on hyödynnetty muun muassa patojen ja vesimyllyjen avulla [20]. Samaan ideaan perustuu pumppuvoimalaitos, joka on tällä hetkellä kapasiteetiltaan suurin ole-massa oleva energiavarasto. Maailman pumppuvoimalaitokset vastaavat kapasiteetiltaan yli 94%:sta maailman energiavarastoista. Uusiutuvien energiamuotojen yleistymisen sekä sähköverkon joustavuuteen kohdistuvien enenevien vaatimusten myötä pumppuvoimalaitosten kapasiteetin odotetaan kasvavan 50% vuoteen 2030 mennessä. [21]

Sen lisäksi, että pumppuvoimalaitoksen avulla voidaan varastoida vesivoimalla tuotettu energia, voi pumppuvoimalaitoksen pumpun käyttämä sähkö olla tuotettu esimerkiksi tuulivoimalla. Tuulivoimaloiden yhteydessä käytössä oleva pumppuvoimala ottaa säilöt-tävän energian ensin verkosta pumpun käyttöön. Tällöin energia muuttuu varastoinnissa muotoaan. [22] Pumppuvoimaloita käytetään suuren mittakaavan energiavarastointiin. Koska pumppuvoimalat pystyvät reagoimaan nopeasti myös suuriin sähkökuorman muutoksiin, käytetään pumppuvoimaloita apuna verkon vakauttamiseen esimerkiksi ta-sapainottamalla muutoksia taajuudessa [23].

Pumppuvoimalaitos rakentuu kuvan 4 mukaisesti kahdesta eri tasolla sijaitsevasta al-taasta. Matalan kulutuksen ja samanaikaisesti halvan sähköntuotannon aikana vettä pumpataan pumpun avulla ylemmään säiliöön. [4, s. 89–90] Tyypillisesti tämä tapahtuu molempiin suuntiin toimivan Francis-turbiinin avulla, joka turbiinikäytön lisäksi mahdollis-taa pumppaamisen [20]. Korkean kulutuksen aikana vesi lasketaan ylemmästä säiliöstä

jälleen alempaan altaaseen. Veden kulkiessa alas altaita yhdistävän putken läpi pyörittää se altaiden välissä olevan turbiinin lapoja, jotka saavat sähköä tuottavan generaattorin pyörimään. [4, s. 90]



Kuva 4 Pumppuvoimalaitoksen rakenne [20, mukaillen]

Olettaen, että energiamuodon muunnoksen hyötysuhde on 0,9, veden tilavuuden V , varastoidun energian E sekä turbiinin hydraulisen korkeuden h suhdetta kuvaa yhtälö $V(m^3) = 400 \frac{E(kWh)}{h(m)}$. Yhtälöstä huomataan, että pumppuvoimalan tehokkuuteen vaikuttavat pumpattavan veden määrä sekä altaiden välinen korkeusero. [19] Haasteelliseksi muodostuukin korkeuserojen ja riittävän kokoisten altaiden kannalta otollisen maaston löytäminen [4]. Usein korkeuseron kasvattamiseksi alempi allas sijoitetaan maan alle, ja ylempänä säiliönä saatetaan käyttää järveä tai merta [22]. Mikäli pumppuvoimalalle ei luonnostaan löydy sopivaa maantieteellistä sijaintia, voidaan alempaa säiliötä varten erikseen louhia tilaa [20].

Pumppuvoimaloiden hyötysuhde on noin 70–80 % [20]. Koko laitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavat muun muassa käynnistys- ja pysähdysaika, syöttöjohdot sekä häviöt voimalan eri osissa, kuten turbiinissa ja generaattorissa [4, s. 90]. Toisin kuin vesivoimaloissa pumppuvoimalan läpi kiertää sama vesi, jolloin pumppuvoimaloiden vesihäviöt ovat vähäiset. [20]

Kulutukseen sidonnaisen sähkön hinnan vaihtelujen hyödyntäminen tekee pumppuvoimaloiden käytöstä taloudellista [23]. Lisäksi pumppuvoimaloiden ylläpitokustannukset ovat matalat [20]. Verrattuna esimerkiksi akkuvarastointiin, pumppuvoimalavarastoinnin hinta energiayksikköä kohden on vähäinen vaihdellen välillä 180–235 €/MWh [24].

Vaikka pumppuvoimalaitos mahdollistaa matalien käyttö- ja ylläpitokustannuksiensa myötä tällä hetkellä kustannustehokkaimman tavan säilyttää suuria määriä energiaa, kriittisenä haittapuolena ovat sen suuret rakennuskustannukset. Tavanomaisen 1 000 megawatin laitoksen rakentamiskustannukset ovat karkeasti arvioituna noin miljardi euroa. [25] Täysin uusien pumppuvoimaloiden rakentamisen sijaan vaihtoehtona on lisätä jo olemassa olevien voimaloiden kapasiteettia tai rakentaa pumppuvoimaloita alun perin muita tarkoituksia palvelevien patojen yhteyteen.

Joet kuljettavat mukanaan ravinteita, jotka kerääntyvät patojen taakse. Tämä sekä vedenkorkeuden vaihtelu altaissa vaikuttaa negatiivisesti rannikkoalueiden kasvistoon ja eläimistöön. Koska pumppuvoimalaitos kuitenkin rakennetaan usein sille jo valmiiksi otolliseen vesijärjestelmään, on ympäristö muokkautunut jo luonnollisesta tilastaan aiemmin palvelemaa rakennelmaa varten. Tällöin pumppujen lisäämisen merkitys ympäristöön on suhteellisen vähäinen. [26]

Poikkeuksena tästä voidaan pitää Kreikan Thissavrokseen suhteellisen muokkaamattomaan ympäristöön rakennettua pumppuvoimalaa. Tässä tapauksessa ei ole täysin selvää, mitkä varastosta aiheutuneet ympäristövaikutukset ovat johtuneet varaston rakentamisesta ja mitkä sen varsinaisesta toiminnasta. Koska Thissavroksen pumppuvoimalan rakennuksen yhteydessä vesistöön rakennettiin erikseen pato, vaikuttaa varasto kokonaisuudessaan voimakkaammin muun muassa ympäristönsä biodivesiteettiin ja maaperään kuin vastaavanlaiset varastot, jotka on jälkiasennettu valmiiden patojen yhteyteen. [26]

Pumppuvoimalaitoksen suurimmat turvallisuusriskit liittyvät vesitasojen vaihteluun ja padon luotettavuuteen. Padon vikautuminen on tapahtuessaan hyvin tuhoisa ympäristölle, mutta kyseessä on kuitenkin tiedostettu riski, jonka tapahtumistodennäköisyys on pieni. Pumppuvoimaloihin liittyvä teknologia on kehittynyttä, joka mahdollistaa patoihin liittyvän riskin perusteellisen hallinnan. [27] Suurin osa pumppuvoimalaitoksista sisältää lisäksi seuranta- ja ohjausjärjestelmän vedentason tarkkailua varten. Järjestelmä voi sammuttaa pumpun automaattisesti, kun veden taso säiliössä nousee asetettujen arvojen yläpuolelle. Järjestelmät ylipumppauksen varalle ovat erityisen tärkeitä voimaloille, joissa ylempi allas on alempaa suurempi. [28]

Yksi merkittävimmistä olemassa olevista pumppuvoimaloista on USA:n Virginiassa 24 000 MWh:n ”maailman suurimmaksi paristoksi” tituleerattu Bathin piirikunnan pumppuvoimala. Sen kuusi turbiinia pystyy generoimaan sähköä 51 miljoonasta litrasta vettä minuutissa. Bathin piirikunnan pumppuvoimala rakennettiin 1985 ja se vaikuttaa kuuden USA:n osavaltion verkon luotettavuuteen. [29]

Muita suurimpia pumppuvoimaloita ovat muun muassa vuonna 2011 valmistunut 2448 MW:n Huizhoun pumppuvoimala Kiinassa sekä 1974 valmistunut 1932 MW:n Okutataragin pumppuvoimala Japanissa. [30] Suurin osa tällä hetkellä rakennuksen alla tai suunnitelmissa olevista yli 1000 MW:n pumppuvoimaloista sijaitsee Kiinassa.

Suomessa ei tällä hetkellä ole yhtäkään pumppuvoimalaitosta. Ydinsähkön kulutushuippujen säätötarkoituksiin suunniteltua pumppuvoimalaa kaavailtiin Korpilahteen 1970-luvulta lähtien, mutta hanke hylättiin ja alueesta tehtiin luonnonsuojelualue [31]. Tällä hetkellä suunnitteilla on rakentaa pumppuvoimala Pyhäjärven kaupungissa sijaitsevaan Pyhäsalmen kaivokseen kaivoksen nykyisen toiminnan loputtua. Mikäli hanke toteutuu, olisi kyseessä maailman suurimmalla pudotuskorkeudella varustettu energiavarasto. [32]

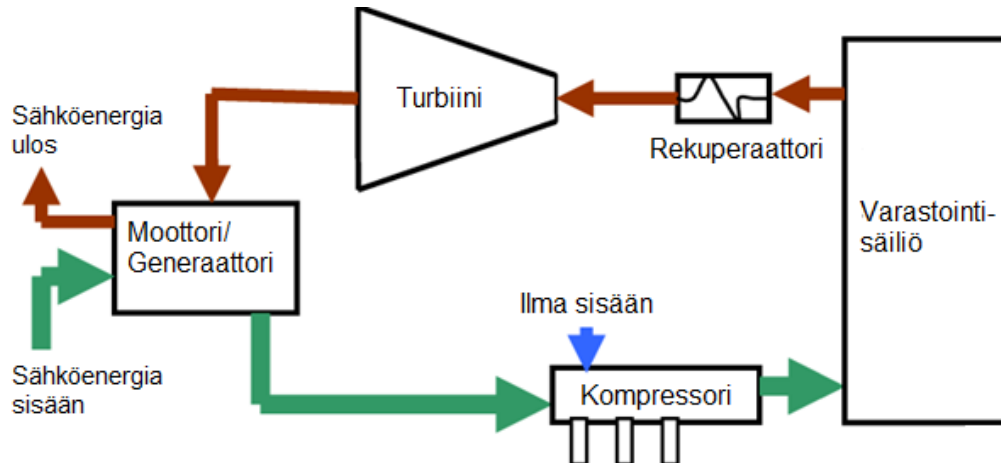
3.2 Paineilmavarasto

Paineilmavarasto on toinen yleisimmistä sähköenergian suuren mittakaavan varastointimenetelmistä. Paineilmavaraston toiminta perustuu korkeaan paineeseen puristettuun ilmaan. Varaston ilma paineistetaan ja säilötään energian matalan kulutuksen hetkenä ja vapautetaan jälleen kysynnän ollessa korkeampi. [18]

Tällä hetkellä maailmassa on kolme teollisuusmittaluokan paineilmavarastoa. Ensimmäinen, varavoimalaitokseksi suunniteltu paineilmavarasto perustettiin vuonna 1978 kahteen suolaesiintymään Saksan Huntorfiin. Käyttötarkoituksena vuoksi Huntorfin paineilmavaraston lataus- ja purkautumisajat ovat lyhyet. Varaston kompressorit pystyvät käsittelemään 108 kg/s:n ilmavirtaa ja turbiini 417 kg/s:n. Huntorfin varaston alkuperäistä 290 MW:n tehoa saatiin nostettua vuonna 2006 turbiiniin tehtyjen parannuksien myötä 321 MW:iin. [33]

Toinen kaupallinen paineilmavarasto perustettiin vuonna 1991 Alabaman McIntoshiin [34]. Edeltäjänsä tuoreempaan teknologiaan nojautuva McIntoshin varasto on hyötyshteeltään parempi, jopa 54 %. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että McIntoshin varastossa käytössä olevan rekuperaattorin avulla varastointiprosessissa syntyvä lämpöenergia saadaan kerättyä talteen ja käytettyä uudelleen. Tämän vuoksi ilman lämmitämiseen käytetyn polttokammion polttoainetarve vähenee. McIntoshin varasto rakennettiin pääasiassa säätövoimalaitokseksi, joten sen teho on huomattavasti Huntorfia pienempi, 110 MW. [33] Energiaa se tuottaa vuodessa kuitenkin 2860 MWh, mikä on noin viisinkertainen määrä Huntorfin laitokseen verrattuna [34].

Tuorein, tutkimuskäyttöön rakennettu paineilmavarasto valmistui vuonna 2013 Teksasin Gainesiin. Se on prototyyppi tuulivoimalla toimivasta paineilmavarastosta. Gainesin paineilmavarastossa ilmanpaineistus tapahtuu täysin tuulivoimaloiden tuottaman sähkön avulla. Paineistuksessa syntynyt lämpöenergia kanavoidaan veteen varastoinnin ajaksi, josta se käytetään myöhemmin vapautetun ilman lämmittämiseen. [35]



Kuva 5. Paineilmavaraston rakenne. [43, mukaillen]

Paineilmavarasto muodostuu kuvan 5 tavoin moottorigeneraattorista, kompressorista, paineastiasta, polttokammioista sekä turbiinista. McIntoshin varastolla käytössä oleva rekuperäätori ottaa talteen matalapaineturbiinilta ulos tulevan ilman hukkalämmön ja korvaa sillä osan polttokammion tuottamasta lämpöenergiasta. Rekuperäätori ei ole välttämätön osa paineilmavarastoa, mutta sen merkitys varastointisyklin hyötysuhteelle on suuri. [36, s. 250–268]

Sähköverkosta peräisin oleva energia antaa virtaa kompressorille, jonka avulla varastoitavan ilman paine saadaan nostettua. Ideaalikaasun tilanyhtälön mukaisesti kaasun paineen P ja tilavuuden V riippuvuutta sen ainemäärästä n ja lämpötilasta T kuvaa kaava $PV = nRT$, missä R on moolinen kaasuvakio. Kaavasta nähdään, että tilavuuden pysyessä vakiona, paineen kasvatus nostattaa systeemin sisäistä lämpöenergiaa. [37] Tällöin ilman lämpötila nousee satoihin asteisiin, minkä vuoksi sitä joudutaan jäähdyttämään [4, s. 91].

Polttoaineella toimivassa paineilmavarastossa ilma paineistetaan haluttuun paineeseen useiden kompressorien avulla. Koska kompressorien vaatima teho on vähäisempää viileälle ilmalle, jäähdytetään ilma kompressorien välissä. Lisäksi lopussa halutussa paineessa oleva ilma jäähdytetään ennen varastosäiliöön siirtämistä, sillä viileämpi ilma

vaatii pienemmän tilavuuden, ja näin ollen varastointikapasiteettia saadaan nostettua. [38, s. 162–167]

Paineistettu ilma säilytetään varastosäiliössä, kunnes korkeamman kulutuksen aikana siihen sitoutunut energia halutaan käyttöön. Tällöin ilma ohjataan paineastiasta generaattoriin yhdistettyyn turbiiniin. Koska lämmin ilma pyörittää turbiinia tehokkaammin, lämmitetään paineistettu ilma ensin polttokammiossa hyötysuhteen nostattamiseksi. [37] Sekä McIntoshin että Huntorfin varastossa polttokammion polttoaineena käytetään maa-kaasua. [39]

Maanalaisena paineilmavarastona voidaan käyttää esimerkiksi suolaesiintymää, kallio-luolaa tai vanhaa kaivosta. Varasto on mahdollista toteuttaa myös maan päällä, mutta erillisen säiliön rakentaminen aiheuttaa voimalalle merkittäviä lisäkustannuksia [4, s. 92].

Kuten pumppuvoimalaitoksissa, paineilmavarastossa energia pystytään vapauttamaan varastosta nopeasti. Paineilmavaraston hyötynä on lisäksi sen suuri energian varastointikyky sekä pitkä elinikä. Esimerkiksi Huntorfin suolaesiintymään rakennettu paineilma-varasto on ollut toiminnassa vuosikymmenten ajan. [40]

Paineilmavaraston hyötysuhde on noin 40–50 %, eli merkittävästi matalampi kuin pumppuvoimavaraston [39]. Hyötysuhteen kannalta olennaista on, pystytäänkö varastointiprosessista tekemään adiabaattinen. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemin sisäenergian muutos ΔU on yhtä suuri kuin siihen kohdistuva työn δW ja systeemin tuodun lämpöenergian δQ summa: $\Delta U = \delta W + \delta Q$. Näin ollen energiamäärä, joka on mahdollista säilyttää paineistetussa kaasussa, riippuu siihen sovelletun varastointiprosessin myötä systeemistä poistuvan lämpöenergian määrästä. [37]

Teoriassa paineistuksessa syntyneen lämpöenergian säilyttäminen systeemin sisällä ja sen uudelleenkäyttö ilman vapauttamisen yhteydessä saisi hyötysuhteen lähenemään 100 %:a. Todellisuudessa kaikkia lämpöhäviöitä olisi mahdotonta poistaa, jolloin hyötysuhde olisi arviolta 70 %. [41]

Tällä hetkellä olemassa olevat paineilmavarastot ovat diabaattisia. Diabaattisessa varastointiprosessissa paineistuksessa syntynyt lämpöenergia vapautetaan ympäristöön. Tällöin hyötysuhdetta huonontavia tekijöitä ovat jäähdyttimen käyttöön sekä uudelleenlämmitykseen kuluva energia. [42]

Adiabaattisen paineilmavaraston toteuttaminen on teknisesti hankalaa ja kallista, mutta kehitteillä. Keskeisimpinä ongelmia ovat korkeasta paineesta ja lämpötilasta johtuvat vaatimukset varaston koneistoon. Adiabaattinen varasto vaatii muun muassa äärimmäisen tehokkaat eristeet lämpöenergian karkaamisen estämiseksi [37]. Lämpösäiliön sekä

kompressorin tulisi kestää 600 celsiusasteen lämpötilaa. Lisäksi turbiinin kapasiteettiin kohdistuu uusia vaatimuksia tehosiheydeltään suuremman ilman vuoksi. [41]

Paineilmavaraston turvallisuusriskinä on varastointisäiliön repeäminen. Paineen alentamiseen tarkoitettujen venttiilien vuoksi kyseessä on kuitenkin harvinainen tapahtuma [43]. Lisäksi paineilmavarastoihin kohdistuvat turvallisuusmääräykset säätelevät varastossa sallitun ilmanpaineen varastointisäiliön materiaalin mukaan.

Suurin ympäristöön vaikuttava tekijä on paineilmavaraston riippuvuus maakaasusta. Paineilmavarasto käyttää kuitenkin vain kolmanneksen siitä polttoainemäärästä, jonka tavallinen kaasuturbiini vaatii saman määrän energian tuottamiseen [10]. Ympäristöhaittoja vähentävä vaihtoehto maakaasulle voisi olla hiilineutraali biopolttoaine. Tällä hetkellä kehitteillä oleva adiabaattinen varastointiprosessi kuitenkin poistaisi kokonaan paineilmavaraston tarpeen ulkoiselle lämpöenergiälähteelle. [35]

Vuonna 2009 käynnistettiin saksalainen projekti ADELE, jonka tavoitteena on rakentaa ensimmäinen adiabaattinen paineilmavarasto. Siinä ilman paineistaminen tapahtuu tuulienergialla ja lämpöenergia tullaan säilyttämään varastoinnin ajan betonisessa paineastiassa. [41] Varastolle on suunniteltu olevan 1 GWh:n varastointikapasiteetti, ja se tähtää 70 %:n hyötysuhteeseen. Varaston rakentaminen on viivästynyt useaan otteeseen teknisten vaikeuksien ja rahoitusongelmien vuoksi. Tällä hetkellä projekti on toistaiseksi hyllytettynä epävarmojen liiketoimintaolosuhteiden vuoksi [44].

3.3 Case-esimerkit

Energiavarastojen kustannuksia on haastavaa vertailla keskenään, koska kustannusrakenteet vaihtelevat merkittävästi. Esimerkiksi paineilmavaraston ja vedyn varastoinnin kohdalla laitoksen teho maksaa paljon, jolloin varastoitavan energian kustannukset kilowattia kohden ovat korkeat. Akkujen ja vauhtipyörien tapauksessa kustannus varaston kapasiteettia eli kilowattituntia kohden ovat korkeat. [4, s. 17]

Taulukossa 1 esitellään Huntorf-paineilmavaraston ja Bathin piirikunnan pumppuvoimalaitoksen ominaisuuksia. Huntorfin voimala valmistui 1978 ja Bathin piirikunnan pumppuvoimalaitos 1985. Molemmat voimalat ovat olleet toiminnassa käyttöönotostaan asti. Molempiin voimaloihin on tehty viime vuosikymmenellä turbiiniparannuksia, jotka ovat vaikuttaneet varastojen tehoon. [29, 26] Taulukon arvot ovat alkuperäisten arvojen mukaisia.

Taulukko 1 Huntorfin paineilmavaraston ja Bathin piirikunnan pumppuvoimalalaitoksen ominaisuudet [26, 45, 46, 47]

	Huntorfin paineilmavarasto	Bathin piirikunnan pumppuvoimalaitos
Teho	290 MW	2 100 MW
Käyttöaika	3 h	11 h
Hyötysuhde	42 %	79 %
Varastointikapasiteetti	580 MWh	23 100 MWh
Varastointitilavuus	310 000 m ³	43 911 000 m ³ (ylempi säiliö) 34 447 000 m ³ (alempi säiliö)
Rakennuskustannukset (nykyarvo)	162 miljoonaa \$	2,3 miljardia \$

Huntorfin varaston käyttökustannuksia syntyy lämmitykseen kuluvan polttoaineen kustannuksista sekä kompressorien sähkön kustannuksista. Varaston 42 % hyötysuhteen myötä se tarvitsee 1 kWh energian ulosantia varten noin 2,4 kWh energiaa, josta 1,6 kWh kuluu lämmittämiseen ja 0,8 kWh kompressorien toimintaan. [41] Tämän lisäksi varaston käyttökustannuksia syntyy ylläpidosta ja henkilöstöstä.

Bathin pumppuvoimalan käyttökustannukset koostuvat pääosin pumpun pumppaamiseen kuluva energiasta. Hyötysuhteensa myötä 1 kWh energian generointia varten varasto vaatii toimiakseen 1,27 kWh energiaa. USA:n keskimääräisen sähkönhinnan (120 \$/MWh) mukaan tämä tarkoittaisi, että varastoinnissa hukkaan kuluva energia aiheuttaisi $0,27 * 0,120 \$ = 0,0324 \$$ kustannukset jokaista varastoitavaa kilowattituntia kohden. Huntorfin tapauksessa summa olisi $1,4 * 0,120 \$/kWh = 0,168 \$/kWh$.

Varastojen kustannuksia voidaan teoriassa vertailla laskemalla varastojen kokonaisinvestointikustannukset kilowattia kohden. Se voidaan laskea määrittämällä huipputehon rakentamisen kustannus (\$/kW) ja lisäämällä siihen varaston arvioidulla eliniällä (h) kerrotut varastointikapasiteettiin suhteutetut käyttökustannukset (\$/kWh). [4, s. 18] Huntorfin paineilmavaraston huipputehon rakentamisen kustannus on nykyarvossa mitattuna

$162\,000\,000\ \$ / 290\,000\ \text{kW} = 558\ \$/\text{kW}$. Vastaava kustannus Bathin piirikunnan pump-
puvoimalalle on $2\,300\,000\,000\ \$ / 2\,100\,000\ \text{kW} = 1095\ \$/\text{kW}$.

Varastojen elinikien arviointi ei ole yksiselitteistä. Tyypillisesti paineilmavarastojen elinikä esitetään olevan 20–40 vuotta, mutta Huntorfin paineilmavarasto on jo ylittänyt tämän aikahaarukan. Pumppuvoimalat ovat myös pitkäaikaisia ja voivat olla toiminnassa jopa 50 vuotta [37, s. 97]. Mitä pidempi varaston ikä on, sitä pidemmälle ajalle investointikustannukset ajoittuvat ja varaston kokonaisinvestointikustannus pienenee.

4. LYHYTAIKAISVARASTOT

Energian lyhytaikaisvarastoja käytetään muun muassa jännite-erojen tasaamiseen, taa-juuspoikkeamien korjaamiseen ja hetkellisinä varalähteinä pääasiallisen teholähteen häiriytyessä. Lyhytaikaisvarastot parantavat sähköön laatua ja verkon luotettavuutta, sillä ne vastaavat jopa millisekunneissa verkon tarpeeseen ja ovat nopean lataus- ja purkautumissyklinsä vuoksi käytettävissä kaikkina aikoina. [18]

4.1 Akut ja paristot

Paristot ja akut perustuvat molemmat energian sähkökemialliseen varastointiin. Paristot voidaan jaotella primääri- ja sekundääriparistoihin sen mukaan, ovatko ne uudelleenladattavia vai eivät. Primääriparisto eli galvaaninen paristo on energiavarasto, joka ladataan ja puretaan vain kerran. Koska latausta ei voida toistaa, niitä ei aina luokitella energiavarastoiksi. Sekundääriparistot kattavat sekä akut sekä ladattavat paristot. Ne kestävät jopa tuhansia lataus- ja purkukertoja. [37, s. 135]

Kun kahdesta elektrodista ja niiden välissä olevasta elektrolyytistä koostuva paristo kytketään ulkoiseen lähteeseen ja sen elektrodien välistä virtaa sähkövirtaa, tapahtuu elektrodipinnoilla sähkökemiallisia reaktioita. [10, s. 15] Näiden reaktioiden aikana toinen elektrodeista sitoo elektroneja eli pelkistyy ja toinen vapauttaa niitä eli hapettuu. Elektrolyytti voi sekä osallistua elektrodeilla tapahtuviin reaktioihin että johtaa sähkövirran elektrodilta toiselle. [4, s. 102] Näin pariston latautuessa ulkoisesta lähteestä peräisin oleva sähköenergia muuttuu pariston sisällä kemialliseksi energiaksi ja elektrodien välille muodostuu sähkömotorinen voima. Kun ulkoinen jännitelähde poistetaan ja piiriin kytketään kuorma, paristo toimii jännitelähteenä. Tällöin elektrodien välille syntynyt sähkömotorinen voima saa aikaan käänteisen reaktion elektrodipinnoilla, jolloin paristo purkautuu. [10, s. 15]

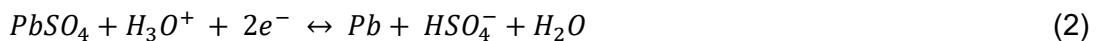
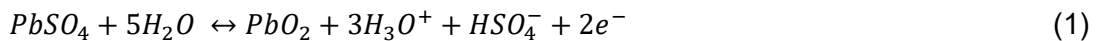
Paristoille olennainen suure on niiden energiatiheys eli kapasiteetti. Se kuvaa kuinka paljon energiaa akkuun on mahdollista varastoida kilogrammaa kohden. Tämän lisäksi akkuja kuvaa niiden tehoteho, elinikä, latauskerrat, ulostulojännite sekä itsepurkautuvuusnopeus. Itsepurkautuvuusnopeus kertoo, kuinka nopeasti ladattu akku kuluttaa potentiaaliaan, kun se on käyttämättömässä tilassa. [37, s. 48–49] Akkutyypin valinnassa tärkeää on huomioida myös turvallisuus- ja ympäristötekijät. Materiaalien myrkyllisyyden

ja reaktiivisuuden lisäksi akkuvarastoinnin turvallisuustekijöitä ovat erilaisten vikatilanteiden mahdollisuus, kuten oikosulut ja virran läpilyönnit. [18]

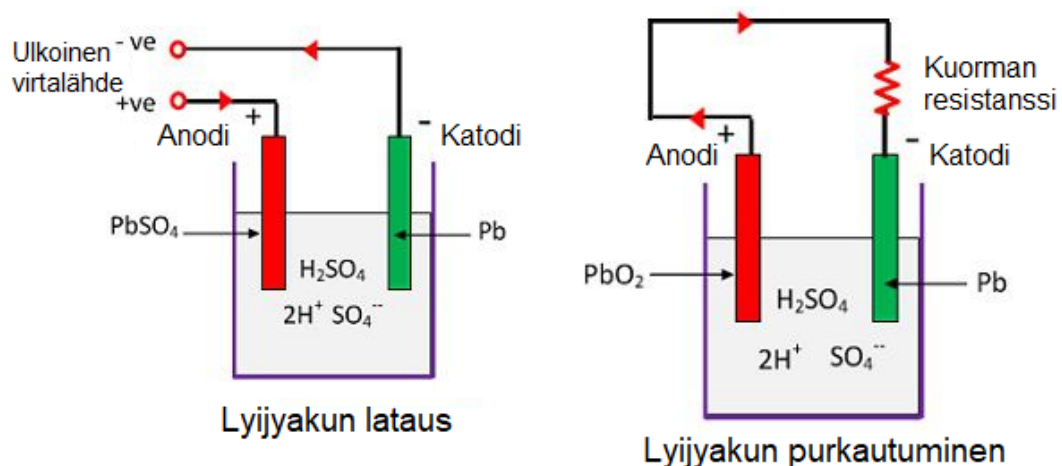
Akun ominaisuuksiin kuten jännitteeseen ja energian varastointikykyyn vaikuttavat pääasiassa elektrodien materiaali ja elektrolyytti. Erilaisilla levyjen rakenteilla voidaan lisäksi saavuttaa erilaisten käyttöolosuhteiden vaatimuksia sekä vaikuttaa akun käyttöikänsä. [4, s. 102]

Sekundääriparistot ovat hyvin laajalti käytetty energiavarasto. Tunnetuin akkutyypin on lyijyakku, jota käytetään muun muassa autoissa ja sähkön laadun sovelluksissa. Lyijyakun anodina on lyijyoksidin ja katodina lyijy. Elektrolyytinä niissä käytetään laimennettua rikkihappoa. Lyijyakku antaa 2 V nimellisjännitteen ja sillä on suuri tehoteho, autoille noin 600 W/kg [18, s. 50]. Lyijyakkuihin kohdistunut kehitystyö on tehnyt siitä taloudellisen akkutyypin. [10, s. 104]

Lyijyakun latautuessaan anodilla (reaktio 1) ja katodilla (reaktio 2) tapahtuvia kemiallisia reaktioita kuvaavat seuraavat yhtälöt:



Ladattaessa anodi hapettuu ja siitä muodostuu positiivinen elektroliitti elektronien virratessa siitä pois. Samanaikaisesti katodi pelkistyy eli sitoo anodilta irronneita ja elektrolyytin läpi virranneita elektroneja yhtälön (2) mukaisesti. Kun akku purkautuu, reaktio etenee kummallakin elektrodilla päinvastaiseen suuntaan. Tällöin elektronien virtaussuunta siis muuttuu ja ne kulkevat anodia kohti. [10, s. 44] Tämä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6 Lyijyakun lataus ja purkautuminen [48, mukaillen]

Lyijyakkujen ongelmana on muun muassa niiden lyhyt elinikä, jota useasti toistuva lataaminen ja purkaminen lyhentää entisestään. Lyijyakkua voidaan ladata vain satoja kertoja. Lyijyakkujen lyhyt elinikä on rajoittaa sen käyttöönottoa energian kysynnän hallinnassa [18, s. 50]. Se on myös herkkä lämpötilamuutoksille ja vaatii huoltamista. Suuresta tehotiheydestään huolimatta lyijyakkujen energiatiheys on suhteellisen pieni, nimittäin 100 Wh/kg [18, s. 49–50], mutta tyypillisesti noin 30 Wh/kg [49]. Energiatiheyttä saataisiin parannettua rakenteellisilla ratkaisuilla, mutta tämä lyhentäisi lyijyakkujen elinikää entisestään [4, s. 104].

Nikkeli-kadmiumakku on toinen yleisesti käytetty uudelleenladattava akkutyyppi. Niissä katodi koostuu nikkelioksidista ja anodi kadmiumista. Elektrolyytin puolestaan käytetään kaliumhydroksidia. Lyijyakkuihin verrattuna se sallii suuren määrän latauskertoja. Se kestää myös paremmin ilmastollisesti haastavia olosuhteita ja sillä on suurempi purkausnopeus. Nikkeli-kadmiumakun yleisin sovelluskohde on pienen kokoluokan AA-paristot. [18, s. 50–51]

Nikkeli-kadmiumakun haittapuolina ovat pieni tehotiheys ja kalleus. Akun toimintaa rajoittaa lisäksi nikkeli-kadmiumakulle ominainen muistiefekti, mistä johtuen käyttämättömän akkukapasiteetin saavuttamiseksi akku on ladattava täyteen. [18, s. 51]

Molempiin akkutyyppeihin liittyy turvallisuuskysymyksiä. Lyijyakuissa käytetty lyijy on myrkyllistä ja se tulee hävittää huolellisesti. Mikäli lyijyakku ylliladataan, saattaa vesi hajota hapeksi ja vedyksi. Tämä kasvattaa riskiä vetyräjähdykselle. Lisäksi lyijyakuissa elektrolyytinä käytetty rikkihappo on syövyttävää. Nikkeliakuissa käytetty kadmium on erittäin myrkyllistä ja ympäristölle vaarallista. Suurin osa nikkelistä kuitenkin voidaan kerätä talteen akun käyttöänsä loppuessa. EU:n lainsäädäntö, joka rajoittaa Ni-Cd -akkujen kehittämistä, edesauttaa Ni-Cd -akkujen korvaamista vähemmän haitallisilla Ni-MH -akuilla. [50]

Tuoreempia akkutyppejä ovat esimerkiksi litiumakut sekä nikkeli-metalli-hydridiakut. Litium on kevyin metalli, joten se soveltuu mainiosti akkukäyttöön. Keveytensä vuoksi litiumakuille saadaan hyvä energiatiheys. [18, s. 52–53] Niillä on pitkä käyttöikä, ja niiden hyötysuhde vaihtelee välillä 86–98 %. [49]. Litiumakkujen suurin käyttösovellus on kannettavissa elektroniikkalaitteissa, joissa niiden markkinaosuus on yli 50 %. [18, s. 52–53]

Koska litium on reaktiivista, tulee elektrolyytinä käyttää orgaanisia nesteitä tai kiinteitä polymeerejä, joihin sähköjohtavuuden tuottamiseksi on liuotettuna litiumsuolaa. Litiumakkujen katodi on metallioksidia, esimerkiksi litiumkobolttioksidia ($LiCoO_2$) ja anodi hiiligrafiittia. Ladattavissa parisoissa keskeistä on, että litium on koko ajan seostuneena joko positiiviseen elektrodiin (kun akku on purkautunut) tai negatiiviseen elektrodiin (kun

akku on latautunut). Näin ollen litium ei ole missään vaiheessa metallimuodossa. [18, s. 52] Litiumakkujen ylilataaminen aiheuttaa metallista litiumia anodille, kasvattaa painetta akun sisällä ja saattaa johtaa räjähtämiseen [51]. Ympäristövaikutukset rajoittuvat pääasiassa ihmisiin kohdistuviin haittoihin, sillä litiumoksidit ja suolat voidaan kierrättää [50].

Muita sekundääriparistotyypppejä ovat esimerkiksi nikkeli-rauta-akut, sinkki-mangaaniakut sekä natrium-rikkiakut. Nikkeli-rauta-akut ovat herkempiä korroosiolle ja ne itsepurkautuvat herkemmin, mistä johtuen nikkeli-kadmiumakut ovat saavuttaneet niitä suuremman suosion. Sinkki-mangaaniakut tarjoavat vaihtoehdon ympäristölle haitalliselle kadmiumille. Niiden kapasiteetti Ni-Cd-akkuihin verrattuna on moninkertainen, mutta elinikä lyhyt. Nikkeli-kadmiumakkujen kadmium voidaan korvata myös metallihydrideillä. Niissä akun antama jännite pysyy lähes samana, mutta energiatiheys on paljon suurempi, eivätkä ne voi ylilatautua. [18, s. 51–53]

Paristossa tapahtuvien hapettumis-pelkistymisreaktioiden kanssa samanaikaisesti tapahtuu palautumattomia prosesseja, jotka rajoittavat akun käyttöikää. [10, s. 15] Esimerkiksi litiumakuissa tapahtuu lämpöhäviöitä, litiumkorroosiota ja kiinteän elektrolyyttikerroksen kasvua anodilla. Muutokset elektrodien rakenteessa ja elektrolyytin palautumaton hajoaminen rajoittavat positiivisen litiumionin diffuusiota. [51] Paristolla on myös sisäinen resistanssi, joka kasvaa pariston kuluessa. Resistanssiin vaikuttavat myös muun muassa pariston koko ja lämpötila. Sisäistä resistanssia voidaan käyttää pariston eliniän arvioimiseen. [52]

Akuista ulos saatava teho ja energiasisältö riippuvat toisistaan. Näin ollen suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto, vauhtipyörät ja superkondensaattorit ovat parempi vaihtoehto sovelluksissa, joissa on saatava suuri teho lyhyessä ajassa. [18, s. 49] Akkujen soveltaminen suuren mittakaavan varastointiin ja energiantuotannon huippujen tasottamiseen on haasteellista. Joitain suuria akkuja on jo käytössä, mutta suurien akustojen rakentaminen on kallista ja niihin kuluva materiaalit kuten litium ovat harvinaisia. [53]

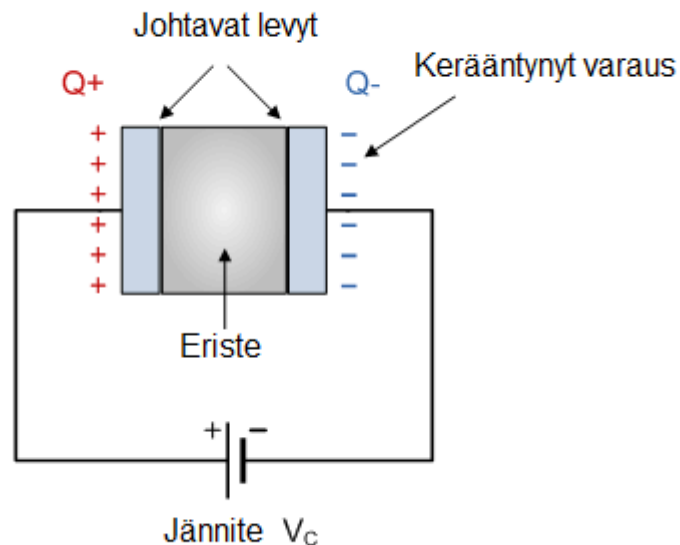
Yksi merkittävimmistä akustoista on Teslan Hornsdale tuulipuistoon rakentama ”maailman suurin litiumparisto”. Sen tehontuotto on 100 MW ja kapasiteetti 129 MWh [54]. Tällä hetkellä Floridan Manateen piirikuntaan on suunnitteilla 900 MWh:n kapasiteetillaan maailman suurin akkuvarasto, jonka käyttöönotto on suunniteltu vuodelle 2021. Akustoa tullaan käyttämään aurinkoenergian varastoimiseen. [55]

Uusien akkutyyppeiden kehitys on hidasta. Akkuihin kohdistuva tutkimus- ja kehitystyö liittyy pääosin niiden kokoluokan suurentamiseen, suorituskyvyn parantamiseen sekä hinnan alentamiseen nykyisissä toimintaympäristöissään. [18, s. 49–53]

4.2 Kondensaattorit

Kondensaattori varastoi energiaa napojensa välille muodostuneeseen sähkökenttään muuntamalla varautuneiden hiukkasten liike-energian sähköenergiaksi. [37] Sähköpiirissä ollessaan, jännitelähteeseen kytkettynä kondensaattori varautuu ja piiristä irrotettuna se toimii lyhytaikaisena paristona. Kun kondensaattori kytketään takaisin sähköpiiriin, levyjen varaukset tasoittuvat, ja sähkökentässä oleva energia vapautuu jännitelähteen tilalle kytketyn kuorman käyttöön. [56]

Kondensaattorivarastoinnille on tyypillistä kondensaattorin latautumisesta ja purkautumisesta koostuvan syklin toistuvuus. Jatkuvassa tilassa kondensaattoripiirissä kulkee suuntaa vaihtava virta eli varauksia, jotka yhteen suuntaan kulkiessaan pyrkivät kerääntymään elektrodeille ja toiseen suuntaan kulkiessaan tasoittamaan muodostuneen varauseron. [37] Kuvassa 7 esitetään latautuneessa tilassa oleva kondensaattori.



Kuva 7 Latautunut kondensaattori [57, mukaillen]

Kondensaattorin kapasitanssi C kertoo, kuinka paljon varausta kondensaattori pystyy varastoimaan sen yli vaikuttavaa jännitettä kohti. Kondensaattorin varastoiman energian

W suhdetta sen kapasitanssiin C ja jännitteeseen V kuvaa kaava $W = \frac{1}{2}CV^2$. [56] Varastointikapasiteetti riippuu elektrodien koosta, etäisyydestä sekä niiden välisen eristeen permittiivisyydestä eli kyvystä polarisoitua. [37]

Kondensaattoria käytetään lyhytaikaisena sähkövarastona sähkön riittävän laadun takaamisessa. Sen avulla pystytään suodattamaan esimerkiksi audiolaitteiden jännitehäiriöitä. Kondensaattori voi toimia myös väliaikaisena tai ylimääräisenä virtalähteenä, kun sähköisen laitteen pääasiallisia paristoja vaihdetaan tai tehon tarve on niissä hetkellisesti suurempi. [58]

Pienen sisäisen resistanssinsa vuoksi kondensaattorin varastoima energia voidaan vapauttaa nopeasti [56]. Samasta syystä kondensaattoria voidaan hyödyntää tehotiheydeltä suurissa käyttökohteissa [37]. Verrattuna akkuihin ja paristoihin kondensaattorin etuna on lisäksi se, että sähköenergia varastoidaan sellaisenaan. Koska energiamuotoa ei tarvitse varastoinnin yhteydessä muuttaa, ei muunnolle tyypillisiä energiahäviöitä tapahdu ja varastoitu energia saadaan nopeammin käyttöön. [56]

Kondensaattorin tehokuutta kuvataan Q -arvolla, joka kertoo reaktanssin suhteen resistanssiin. Mitä suurempi Q -arvo on, sitä ideaalisempi kondensaattori on. Kondensaattorin sisäisen resistanssin lisäksi muita epäideaalisuuksia ovat muun muassa riittävän suuresta jännitteestä johtuvat läpilyönnit eristeiden epätäydellisyydestä johtuvat tehohäviöt. Eristeen dielektriset häviöt kasvavat lämpötilan noustessa, kun eristeen johtavuus lisääntyy. [59]

Kondensaattorin haittapuolena on sen pieni varastointikapasiteetti, minkä vuoksi se soveltuukin ainoastaan sähköenergian lyhytaikaiseen varastointiin [4]. Kondensaattorin elektrodien pinta-alaa kasvattamalla voidaan kuitenkin lisätä sen varauskykyä. Yksinkertaisimmillaan tämä on tapa luoda superkondensaattori.

Levyjen pinta-alaa saadaan kasvatettua käyttämällä niiden materiaalina huokoista materiaalia, kuten aktiivihiliä. Pienempi kuin 1 nm väli superkondensaattorin levyjen välillä vaatii nestemäisen eristeen, joiden käyttö rajoittaa superkondensaattoreiden kestämiä jännitteitä. Jännitteen nostamiseksi ja sisäisten oikosulkujen ennaltaehkäisemiseksi superkondensaattorit kytketäänkin sarjaan. [60] Superkondensaattoreiden varastointiaika vaihtelee sekunnista minuutteihin. Ideaalisen kondensaattorin hyötysuhde on 0,95, joka pienenee, kun kondensaattorin varaus purkautuu suunniteltua nopeammin. [19]

Superkondensaattoreiden teknologia on kehittynyt nopeasti viime vuosina. Ne tarjoavat mahdollisesti tulevaisuudessa vaihtoehtoisia ratkaisuja muun muassa sähköautoihin ja teollisiin moottoreihin [56]. Superkondensaattorien hyödyntäminen esimerkiksi jarrujär-

jestelmissä saattaa vähentää ympäristöpäästöjä. Mahdolliset negatiiviset ympäristövaikutukset aiheutuvat kondensaattoreissa käytetyistä materiaaleista. [50] Superkondensaattorien tarvittaessa nopeaa lataus- ja purkautumisaikaa voidaan säätää, joten niitä voidaan käyttää akkujen tavoin. Akkuihin verrattuna ne kestävät kuitenkin useampia latauskertoja ja ne ovat tehotehokkuudeltaan suurempia. [18]

4.3 Sähkömagneettinen energiavarasto

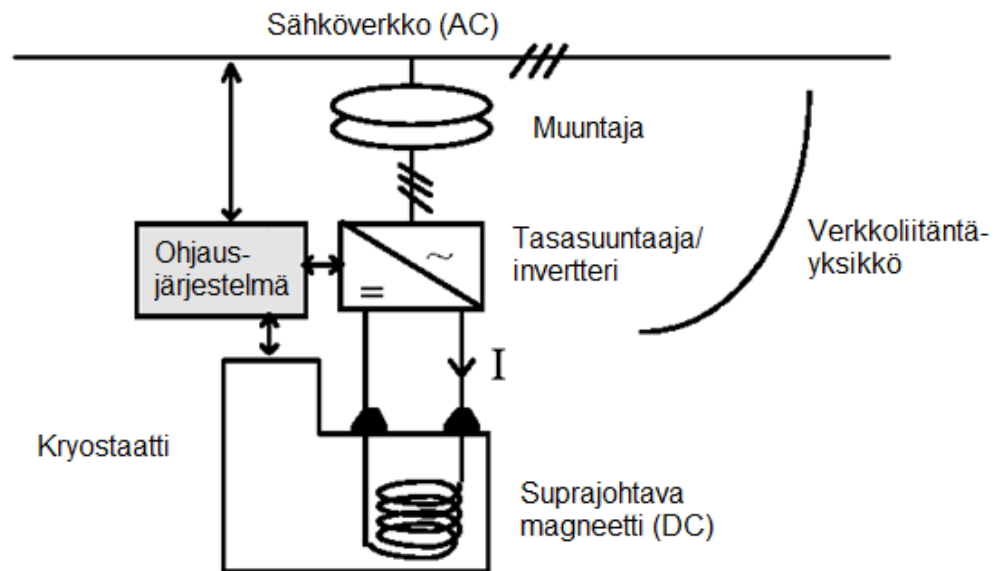
Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto eli SMES (engl. Superconducting Magnetic Energy Storage) tarjoaa kondensaattorin lisäksi toisen keinon varastoida sähköenergiaa ilman energiamuodon muuntamista. SMES perustuu materiaalien kykyyn muuttua suprajohtaviksi äärimmäisen matalissa lämpötiloissa. Suprajohtavassa tilassa materiaalin resistiivisyys katoaa. Tällöin virta voidaan laittaa kiertämään loputtomasti suprajohtavassa käämissä ilman energiahäviöitä. Energia varastoituu sähkövirran luomaan magneettikenttään. Kun energialle on kysyntää, puretaan se piiristä takaisin sähköverkkoon. [9]

Ulkoiseen magneettikenttään sijoitetulle suprajohteelle tapahtuu niin kutsuttu Meissnerin ilmiö. Suprajohde luo vastakkaissuuntaisen magneettikentän, joka estää ulkoista magneettikenttää työntymästä suprajohteen sisään. Tällöin magneetti voidaan saada levitöimaan suprajohteen päällä. Meissnerin ilmiö havaitaan vain silloin, kun ulkoinen magneettikenttä on kullekin suprajohteelle ominaista kriittistä magneettikenttää pienempi ja kun lämpötila on riittävän alhainen. [61]

Suprajohteet jaetaan kahteen ryhmään sen perusteella, miten ne käyttäytyvät magneettikentän läheisyydessä. Suurin osa suprajohtavista materiaaleista kuuluu tyyppin I johteisiin, joissa sähkövirta kulkee vain johtimen pinnalla. Tyyppin I suprajohteet menettävät suprajohtavan ominaisuutensa yhtäkkiä, kun magneettivuon tiheys kasvaa riittävästi. Tyyppin II suprajohteet ovat seoksia, joiden suprajohtavuus puolestaan katoaa vähitellen magneettivuon tiheyden kasvaessa. Ne saavuttavat suprajohtavan tilan tyypillisesti korkeammassa lämpötilassa kuin tyyppin I suprajohteet, jotka ovat yleensä puhtaita alkuaineita. [62]

SMES-järjestelmä koostuu kuvan 8 tavoin muuntajasta, AC/DC-konvertteristä, ohjausjärjestelmästä, kryostaatista sekä suprajohtavasta magneetista. Varastoitava sähkövirta otetaan verkosta ja muunnetaan verkkoliitäntäyksikköön kuuluvan tasasuuntaajan avulla tasavirraksi. [18] Sähkövirta ohjataan sitten suprajohtavaan käämiin, jonka resistanssi

on poistettu jäädyttämällä se kryogeeniseen lämpötilaan. Alhainen lämpötila saavutetaan heliumin avulla. Johdemateriaaleina käämissä käytetään pääasiassa niobititaania. [63]



Kuva 8 SMES-järjestelmä [64, mukaillen]

Käämin magneettikenttäänsä varastoima energia E saadaan laskettua jouleina suhteessa käämin induktanssiin L ja johtimessa kulkevaan kriittiseen sähkövirtaan I kaavan $E = \frac{1}{2}LI^2$ mukaisesti. Varaston purkausjakso voi varaston koosta riippuen vaihdella sekunneista tunteihin, mistä johtuen sitä voidaan soveltaa eripituisten häiriöiden korjaamiseen sähköntuotannossa ja -jakelussa. [18]

Suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston käämi on muodoltaan solenoidi tai toroidi. Näistä laajemmin käytössä on yksinkertaisempi ja kustannustehokkaampi solenoidi. Solenoidi aiheuttaa kuitenkin ympärilleen toroidia voimakkaamman magneettikentän, josta saattaa olla haittaa ympäristössä olevalle laitteistolle. [65]

Kun käämi on ladattu, se persistoidaan eli sen sisällä olevan magneetin navat oikosuljetaan pysyvän tilan saavuttamiseksi. Tällöin virtalähde ei enää syötä käämiin virtaa. Kun virta halutaan jälleen käyttöön, muutetaan se invertterillä vaihtovirraksi ja syötetään takaisin verkkoon. [9] Sähkövirran muuntamisesta aiheutuu 2–4 % energiahäviöt kummallakin kerralla. [18]

SMES-järjestelmät voivat saavuttaa jopa 90–95 % hyötysuhteen. Järjestelmän kapasiteettiin sekä magneettikentän voimakkuuteen vaikuttavat muun muassa käämin muotoilu, induktanssi sekä sen lämpötila. [66] Suprajohtaisen sähkömagneettisen varaston mitättömät häviöt mahdollistavat energian varastoinnin teoriassa hyvinkin pitkäksi ajaksi. Lisäksi suprajohtava käämi voi purkaa suuren määrän energiaa lyhyessä ajassa, jopa kymmenesosasekunnissa [63]. Suurimpia SMES-järjestelmiä voidaan käyttää energian tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen. [66] Tällä hetkellä SMES-järjestelmiä käytetään kuitenkin pääasiassa sähkön laadun parantamiseen [63].

Välittömän ympäristön suojelemiseksi suurimmat SMES-järjestelmät vaativat suojaustoimenpiteitä magneettikenttään, jonka käämi luo ympärilleen. [50] Magneettikentällä voi olla biologisia vaikutuksia ihmisiin ja kasvistoon. Lisäksi magneettikenttä vaikuttaa joihinkin laitteisiin kuten mikroprosessoreihin, autoihin ja lentokoneisiin. [67] Magneettikentän lisäksi matalien lämpötilojen käyttö vaatii omat turvallisuustoimenpiteensä [50].

SMES-järjestelmän haasteena on siihen liittyvän teknologian kalleus [63]. Varastointikustannuksia laskiessa huomioitavaa on kuitenkin varaston pitkä elinikä. Suprajohtaviin sähkömagneettisiin energiavarastoihin ei liity muun muassa hajoavia kemikaaleja, jotka rajoittaisivat lataussykliä määrää.

Suuri osa järjestelmän kustannuksista aiheutuu suprajohtavan tilan ylläpitämisestä eli käämin jäähdyttämisestä. [63] Jäähdyttämisen lisäksi tukirakenteet aiheuttavat merkittäviä kustannuksia, mutta niiden suhteellinen osuus kustannuksista vähenee laitoksen koon kasvaessa. Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto tulee taloudellisesti kilpailukykyiseksi vasta suuren mittakaavan varastoinnissa. [4]

Nykyiset suprajohtavat magneettiset energiavarastot toimivat nestemäisen heliumin lämpötilassa, -269 celsiusasteessa. Keraamisten puolijohteiden korkeassa lämpötilassa ilmenevien suprajohtavien ominaisuuksien löytymisen myötä on odotettavissa, että korkeamman lämpötilan SMES-järjestelmiä tullaan rakentamaan. Näissä järjestelmissä jäähdytys toteutetaan nestemäisen typen avulla, jonka vaatima lämpötila on -190 celsiusastetta. Koska nestemäisen typen tuottamiseen liittyvä teknologia on kehittynyt ja kustannustehokasta, jäähdytysjärjestelmään liittyvät kustannukset tulisivat vähenemään huomattavasti. [10, s. 13]

Korkean lämpötilan SMES-järjestelmien kehitys on yhä varhaisessa vaiheessa. Ne soveltuvat suuren mittaluokan energian varastointiin, koska nestemäisellä tyypellä toimiva jäähdytysmenetelmä tarjoaa stabiilin ja homogeenisen lämpötilan systeemiin. Ongelmaksi niissä muodostuu vaadittujen johdinmateriaalien, yleisimmin vismutti-strontiumkalsium kuparioksidin, korkeat hinnat sekä matala sähkövirran tiheys. [68]

Kun tarkastellaan suuremman energiamäärän varastoinnista syntyviä hyötyjä ja järjestelmän jäähdyttämisestä aiheutuvia kustannuksia, on SMES-järjestelmän optimaalinen toimintalämpötila näiden vaihtoehtojen välillä, noin 30 K:n eli -243 celsiusasteen lämpötilassa. Tämän kompromissimuodon ongelmat liittyvät niille otollisten jäähdytysmateriaaleihin kalleuteen ja turvallisuusriskeihin. [68]

4.4 Vetyvarastointi ja polttokennot

Maapallolta löytyvä vety on melkein aina sitoutuneena johonkin muuhun aineeseen. Vetyvarastointi edellyttää vedyn valmistamisen eli erottamisen näistä yhdisteistä. Näin ollen vety voidaan käsittää energiavarastona, sillä se on synteettinen polttoaine, jonka valmistamiseen kuluu energiaa. [37, s. 122] Yksi vedyn eduista on, että se on hiilivapaa polttoaine, jonka palaessa vapautuu ainoastaan vesihöyryä. Merkittävimpiä sovelluskohteita vetyenergialle ovat muun muassa liikennepolttoaineet, hajautettu sähköntuotanto ja uusiutuvan energian varastointi sekä siirto. [69]

Vedyn valmistukseen vaadittu energia voidaan ottaa talteen voimalaitoksista sähkön matalan kulutuksen aikana ja ottaa jälleen käyttöön kaasuturbiinien tai polttokennojen avulla. Vedyn valmistus voi tapahtua esimerkiksi maakaasusta reformoimalla. [70] Siinä vedyn ja hiilen väliset sidokset rikotaan vesihöyryn avulla, ja reaktiotuotteena syntyy vetyä ja hiilidioksidia. Reformointi maakaasusta on tällä hetkellä varmin ja edullisin keino tuottaa vetyä. [69] Muita tapoja vedyn valmistukseen ovat muun muassa elektrolyysi, eli hapen ja vedyn erotus vedestä sähköenergian avulla, sekä biomassan fermentointi. [70]

Vedyn valmistus voi tapahtua keskitetysti tai hajautetusti. Se voidaan reformoida maakaasusta putkiverkon solmukohdissa tai loppukulutuskohteessa. Taloudellisin vaihtoehto ja järjestelmän kokonaiskustannukset määräytyvät tuotanto- ja jakelukustannusten rakenteesta sekä niiden määrästä suhteessa vaihtoehtoihin ratkaisuihin. [69] Myös vetyvarastoinnin ympäristövaikutukset määräytyvät tuotantotavan mukaan. Mikäli valmistuksessa käytetty sähkö on uusiutuvalla energialla tuotettua, on varastointitapakin hiili-neutraali. Parhaillaan kehityksessä on tekniikka, jossa maakaasuvalmistuksessa vapautuva hiilidioksidi kerätään talteen. Tämä vähentäisi fossiilisista raaka-aineista valmistetun vedyn hiilijalanjälkeä. [70]

Vetyä voidaan varastoida paineisena kaasuna, nesteytettynä tai hydridinä. Koska vety nesteytyy vasta hyvin alhaisessa lämpötilassa, -252,87 celsiusasteessa, tarvittu jäähdyttäminen tekee nesteytetyn vedyn varastoinnista energiaa kuluttavan ja kalliin. [4, s. 128] Lisäksi varastoinnin aikaiset energiahäviöt ovat nesteytetylle vedylle merkittävät, joten

säiliön on oltava tyhjiöeristetty [69]. Nestemäisen vedyn varastointi on paikallaan vain lyhytaikaista varastointia tai energiankuljetusta varten. [4, s. 128] Haasteellisuutensa vuoksi nestemäistä vetyä käytetään pääasiassa avaruussovelluksissa, jossa hyödytään nesteytetyn vedyn parantuneesta energiatiheudesta. [72, s. 70]

Vedyn yleisin varastointikeino on painesäiliöön puristettu kaasu. [4, s. 128] Koska vedyllä on pieni tiheys, sen energiatiheys tilavuuteen suhteutettuna on huono. [71] Ideaalikaasun tilanyhtälön mukaisesti paineen kasvattaminen lisää vedyn ainemäärää tilavuutta kohden. Tällöin siitä saatava energia on kaasun paine kertaa paineastian tilavuus. Perinteinen vetysäiliö on teräksestä valmistettu kaasupullo, jossa vety on 200–300 baarin paineessa [69]. Suuremman mittakaavan kaasuvälikonissa käytetään myös maanalaisia luolia. Maakaasuun verrattuna vety vaatii maanalaiselta säiliöltään paremman eristykseen, sillä paineistetun vedyn diffuusiokyky on korkea. [73] Suurimmassa osassa kivirakenteista kapillaarihuokosissa oleva vesi kuitenkin tekee säiliöstä tiiviin [37, s. 129].

Autoteollisuudessa käytetyn paineistetun kaasun paine on kansainvälisesti sovittujen standardien mukaan joko 350 tai 700 bar [69]. Säiliöön voidaan varastoida vetyä 700 baarin paineessa jopa 5,6 MJ/litra. Varastoinnin turvallisuuden takaamiseksi autoissa käytettävät säiliöt paineistetulle vedylle ovat kerrostettuja koostuen alumiiniseoksista, hiilikuitulujitetuista muoveista sekä lasikuidusta. [73]

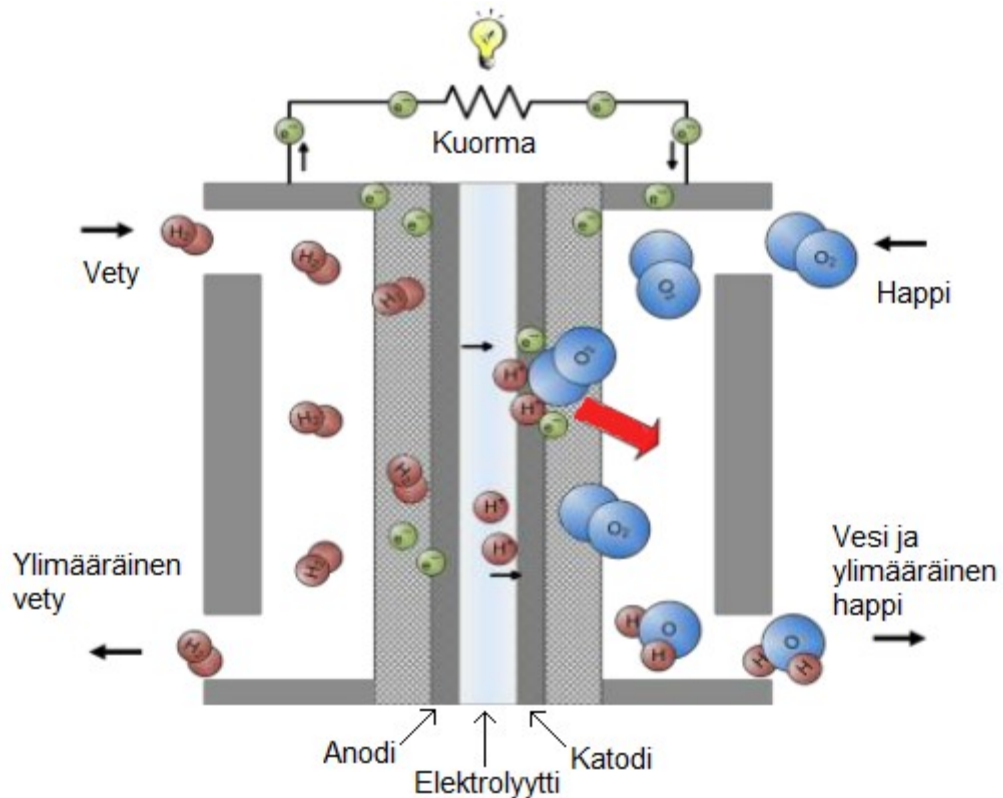
Säiliömateriaalin vahvistamiseen käytetyt kalliit kuidut aiheuttavat kustannuksia paineistetun vedyn varastoinnille. Vedyn säiliöltään vaatimaa tilavuutta saataisiin pienennettyä jäähdytyksen avulla, mutta vaadittu jäähdytysjärjestelmä vie tilaa. Varaston tilavuus pyritään minimoimaan etenkin ajoneuvon rakenteissa. [14] Nestemäisen vedyn varastointikustannukset koostuvat pääasiassa jäähdytyksestä sekä tehokkaasti lämpöeristetyistä kryogeenisäiliöistä. [71]

Kolmas tapa varastointitapa on vedyn varastointi hydridien muodossa, eli metallien tai metalliyhdisteiden hilaan yhdistettynä. Yhdistyminen tapahtuu kullekin metalliyhdisteelle ominaisessa paineessa ja lämpötilassa. [69] Vety saadaan vapautettua hydridistä ylipaineen avulla. Kaasumaiseen ja nestemäiseen varastointiin verrattuna vedyn tiheys tilavuutta kohden on suurempi hydrideissä. Hydridin muodostuminen on eksotermisen tapahtuma, eli hydridiä on lämmitettävä vedyn vapauttamiseksi. [37, s.130] Tästä johtuen hydridi on vedyn varastointimuodoista turvallisin, sillä vety ei pääse vuotamaan yhdisteestä itsekseen. Metalliyhdisteet kuitenkin pystyvät sitomaan vetyä vain maksimissaan 10 % omasta massastaan. Haasteita hydridivarastointiin aiheuttavat lisäksi käyttölämpötilat ja -paineet. [71]

Matalassa lämpötilassa toimivaa FeTi-hydridiä kehitellään parhaillaan New Yorkin osavaltiossa USA:ssa. FeTi-hydridi vaatii vedyn vapauttamiseen vain pienen määrän energiaa. [37, s.130] Lisäksi kiinnostus on viime aikoina kohdistunut magnesiumipohjaisiin hydrideihin, niiden edullisuuden ja magnesiumin helpon saatavuuden vuoksi. Magnesiumhydrit ovat myös kevyitä ja ne pystyvät sitomaan vetyä jopa 7,7 % magnesiumin massasta. Magnesiumhydridin haasteena on sen hidas reaktionopeus sekä erittäin korkea lämpötila, joka tarvitaan vedyn vapauttamiseksi hydridistä. [72 s. 137]

Polttokennoissa tapahtuva kemiallinen reaktio on yksi tapa hyödyntää vedyn kantama energia. Vetyä polttoaineenaan käyttävät polttokennot yhdistävät hapen ja vedyn ja synnyttävät hapettumisen reaktiotuotteena sähköenergiaa ja vettä. Polttomoottoreihin verrattuna polttokennoilla on parempi hyötysuhde ja niistä aiheutuu vähemmän ympäristöpäästöjä. Polttokennot ovatkin huomattavasti suositumpi vedyn käyttösovellus. Tyypillisen polttokennon käyttöjännite on n. 0,7 V. Jännitteen nostamiseksi niitä voidaan kytkeä sarjaan kennostoksi. Akusta poiketen polttokenno toimii jatkuvasti, eikä sykleissä. [69] Polttokennojen hyötysuhdetta voidaan parantaa ottamalla prosessissa syntyvä hukkalämpö talteen [74]. Tämän myötä polttokennojen hyötysuhde voi parhaimmillaan olla 70–80 % [69]. Tyypillisesti hyötysuhde on noin 45–55 % [18, s. 55].

Kuvan 9 tavoin polttokennot muodostuvat katodista ja anodista, elektrolyytistä sekä katalyyteistä. Vety-happi-polttokennon anodilla tapahtuu hapettuminen. Tällöin vetymolekyyleistä irtoaa elektroneja ja niistä muodostuu H^+ -ioneja. Ionit siirtyvät anodille elektrolyytin läpi ja elektronit polttokennoon yhdistetyn kuorman, kuten sähkömoottorin kautta. Anodilla tapahtuu pelkistyminen, jossa sinne johdettu happi yhdistyy elektroneihin ja vetyioneihin, muodostaen vettä. [69]



Kuva 9 Tavanomaisen PEM (Proton Exchange Membrane) -kennon rakenne [75, muokailen]

Vedyn ja hapen osapaineiden sekä kennon lämpötilan pienentäminen pienentävät polttokennon jännitettä. Kennosta ulos saatavaan jännitteeseen vaikuttaa lisäksi neljä häviötä: aktivaatioylijännite, ohminen häviö, konsentraatioylijännite sekä vuotovirtahäviö. [76]

Aktivaatioylijännite johtuu elektronien hitaasta liikkeestä elektrodeilla ja on merkittävää, kun virrantiheys on pieni. Häviötä voidaan pienentää nopeuttamalla polttokennossa tapahtuvia reaktioita esimerkiksi katalyyttien avulla tai nostamalla lämpötilaa. Aktivaatioylijännitteen merkitys korostuu PEM-kennoissa, koska ne toimivat matalissa lämpötiloissa. Ohminen häviö johtuu kennojen sisäisten osien, kuten elektrodien vastuksista ja kontaktiresistansseista. Ohmisten häviöiden merkitys on suurin keskiuurilla virrantiheyksillä. Kolmas jännitehäviö eli konsentraatioylijännite aiheutuu siitä, kun tarve elektrodeilla tapahtuvien reaktioiden lähtöaineille on suurempi kuin niiden diffuusio kyseiselle alueelle. [76] Vuotovirtahäviö johtuu siitä, kun osa polttokennolle syötetyistä lähtöaineista kulkee elektrolyytin läpi tuottamatta sähköä. Vuotovirtahäviöt ovat polttokennoissa yleensä vähäisiä, eivätkä ne vaikuta merkittävästi hyötysuhteeseen. [77]

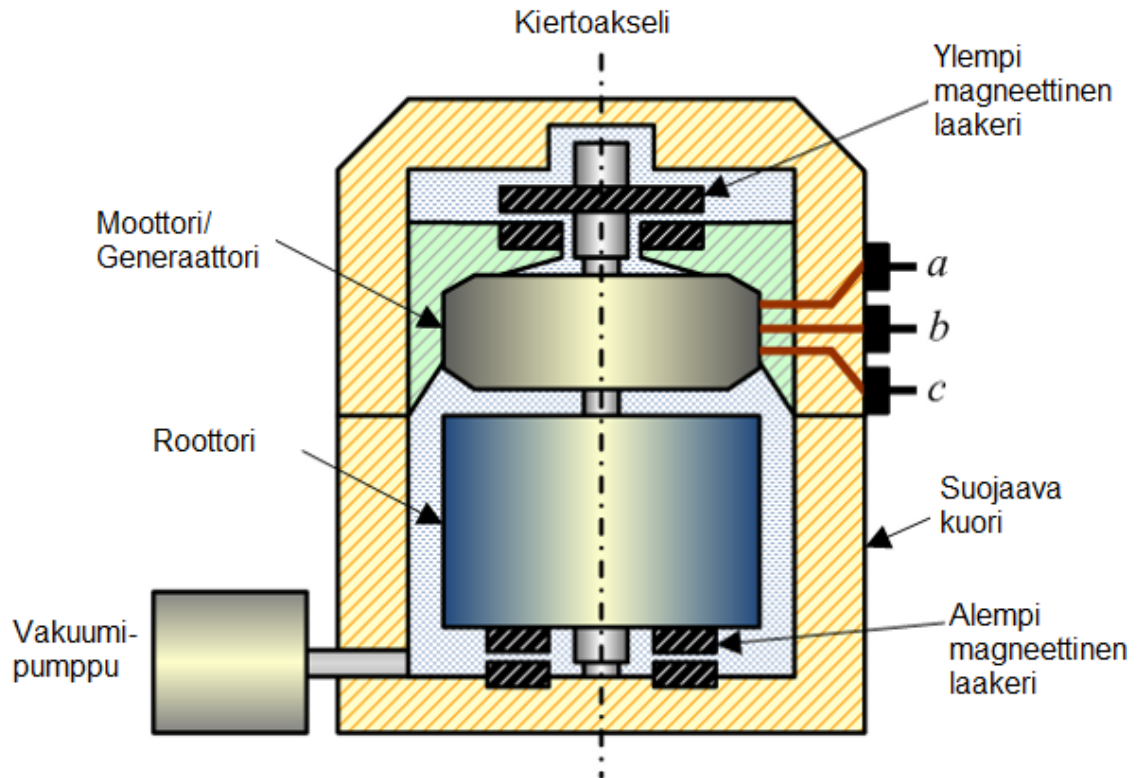
Vetypolttokennoautot tarjoavat hyötysuhteeltaan hyvän vaihtoehdon fossiilisille polttoaineille ja biopolttoaineille. Maakaasusta reformoidulla vedyllä toimivilla polttokennoautoilla on parempi energiahyötysuhde kuin suoraan maakaasulla toimivilla polttomoottorautoilla. Keskeisenä kennovaihtoehtona pidetään PEM-kennoa sen riittävän tehokkuuden ja sopivan alhaisen käyttölämpötilan vuoksi. Käyttötesteissä polttokennoille on saavutettu jo normaalille henkilöautolle riittävän pitkä käyttöikä sekä -lämpötila, joten suurimpien autovalmistajien seuraava askel on kennojen tuotteistaminen. Kehitys kohdistuu lisäksi komponenttien painon sekä polttokennojen vaatiman tilan pienentämiseen. [69]

4.5 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä on yksi vanhimmista energian varastoinnin mekanismeista ja sen toiminta perustuu energian varastointiin pyörimisliikkeeseen. [4, s. 94; 18] Se voi yksinkertaisimmillaan olla koneen akselille kiinnitetty raskas teräskiekko. Alempien käyntinopeuksien vauhtipyörät pyörivät noin 7 000 kierrosta minuutissa, kun taas nopeudeltaan suurimmat vauhtipyörät jopa 100 000 kierrosta minuutissa [18, s. 69]. Vauhtipyörä on lyhytaikainen energiavarasto, johon liittyvän tekniikan tulee vielä kehittyä ennen kuin siihen on taloudellisesti ja teknillisesti kannattavaa varastoida suurempia energiamääriä. [4, s. 94]

Vauhtipyörän kiekko pyrkii stabiloimaan saavuttamansa pyörimisliikkeen ja siksi sitä voidaan käyttää muun muassa tasoittamaan epäsäännöllisesti pyörivän moottorin käyntiä. Vauhtipyörien yleisin sovelluskohde ovatkin polttomoottorit, joissa edestakainen liike muutetaan pyörimisenergiaksi [18, s. 66]. Toinen merkittävä sovelluskohde on paikat, joissa täysin keskeytymätön sähkön saanti on kriittistä, kuten esimerkiksi leikkaussalit. Tällöin vauhtipyörä toimii varalähteenä muutamien sekuntien ajan varavoimalähteen käynnistyessä. [78] Vauhtipyöriä on lisäksi käytetty laivaston ja avaruusalusten ohjauslaitteistoissa. [37, s. 83]

Kuvassa 10 esitetään vauhtipyörän rakenne. Vauhtipyörää ladattaessa siihen kytketty, sähköverkosta energiaa saava moottori-generaattori toimii moottorina ja pyörittää vauhtipyörää. Suurimpien nopeuksien vauhtipyöriin käytetään pääasiassa oikosulku-, reluktanssi- ja kestopagneettimoottoreita. Kun pyörimisliikkeeseen varastoitunut energia halutaan käyttöön, hidastuu vauhtipyörän vauhti moottori-generaattorin toimiessa generaattorina. Moottori-generaattorin koko suhteessa pyörivään massaan riippuu vauhtipyörän käyttösovelluksesta. Tehon tuottoon käytettyihin tehovauhtipyöriin varastoidaan energiaa vain sekunneiksi, jolloin pyörivä massa on pieni, mutta moottori-generaattori suuri. Energian tuottoon tarkoitettua pidempiaikaista varastointia varten on pyörivä massa suuri ja moottori-generaattori pienempi. [18]



Kuva 10 Vauhtipyörän rakenne [79, mukailen]

Energiamäärä E_k , jonka vauhtipyörä varastoi roottorinsa pyörimisenergiana saadaan kaavalla $E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$, missä I on hitausmomentti, eli vauhtipyörän kyky vastustaa pyörimisliikkeen muutosta, ja ω on kiekon kulmanopeus. [18] Varastoinnin tehokkuuden kanalta keskeistä on vauhtipyörän massa, muoto sekä niiden määrittämä hitausmomentti. Esimerkiksi ohutreunaisen, onttosylinterisen vauhtipyörän hitausmomentti on $I = mr^2$. [37, s. 77]

Vauhtipyörän muoto vaikuttaa hitausmomentin lisäksi roottorin vetolujuuteen, eli sen kykyyn kestää vastakkaisiin suuntiin vetävää voimaa. Vauhtipyörä murtuu, kun siihen kytketyn roottorin kiertovoima ylittää vauhtipyörän vetolujuuden. Sylinterin vanteen vetolujuus on verrannollinen sen tiheyteen, säteen neliöön sekä kulmanopeuden neliöön. Äärimmäisen suurissa nopeuksissa hajoava vauhtipyörä on pitkään ollut turvallisuusriski, joka on estänyt suurempien energiamäärien varastoinnin vauhtipyörään [14, s. 97].

Viimeaikainen kehitys vauhtipyörän materiaalien tekniikassa on mahdollistanut varastointiajan pidentämisen [37, s. 78]. Uusimmat nopean vauhdin vauhtipyörät rakennetaan keveytensä vuoksi komposiittimateriaaleista tai niiden yhdistelmistä, esimerkiksi grafiittilasikuidusta [18]. Nämä materiaalit ovat tiheydeltään matalia, mutta niiden vetolujuus on korkea [37, s. 78].

Suuren energiatiheyden saavuttamiseksi on suunniteltu vauhtipyöriä, jotka ovat paksuimmillaan akselin lähistöllä ja kapenevat reunaa kohti. Niissä vauhtipyörään kohdistuva rasitus jakautuu tasaisesti. Komposiittimateriaaleille toimivampi muoto on tosin vanne, sillä umpinaiselle vauhtipyörälle olennainen poikittaislujuus on näille materiaaleille keho. [37, s. 80]

Anisotrooppisten kuitukomposiittimateriaalien sekä niiden valmistukseen liittyvät kustannukset ovat huomattavasti matalampia kuin puu- tai metalliseosvalmistuksen kustannukset. Kuitulujitetun muovin käyttö vauhtipyörien valmistamisessa on lisäksi mahdollistanut jopa $3,6 \cdot 10^{10}$ joulen varastoinnin muutamien tuntien ajaksi. Lasikuidulla ja hiilikuidulla on sama luontainen vahvuus, mutta lasikuitu on kimmoisampaa materiaalia, minkä takia sidosaaine saattaa haljeta kovassa rasituksessa. Lisäksi, mikäli lasikuitu altistuu kosteudelle, kuitujen vetolujuus heikkenee. [37, s. 81]

Kaksi merkittävintä vauhtipyörävarastoinnin hyötysuhteeseen vaikuttavaa tekijää ovat ilmanvastuksen aiheuttamat häviöt sekä laakerointi. Ilmanvastuksen häviöihin vaikuttavat muun muassa vauhtipyörää ympäröivän kammion paine sekä vauhtipyörän pinta-ala. Häviöitä voidaan minimoida sijoittamalla vauhtipyörä tyhjiökammioon. [37, s. 83] Tyhjiökammiossa ovat kuitenkin omat ongelmansa, sillä se muun muassa vaatii oman laakerointijärjestelmän sekä kammion kaasuilla oleva matala läpilyöntijännite saattaa aiheuttaa vaurioita moottorin liukurenkaisiin. Tyhjiöjärjestelmän vaatimaa energiamäärää tulee verrata sen avulla vähennettyihin energiahäviöihin sen käyttöä harkitessa. [80]

Varastointiaika vaikuttaa suuresti laakerointihäviöihin. Mikäli vauhtipyörävarasto puretaan välittömästi sen latauksen jälkeen, saadaan hyötysuhteeksi tyypilliselle 200 000 kg roottorille noin 85 %. Viiden tunnin mittaisen varastoinnin jälkeen hyötysuhde tippuu kuitenkin 78 %:iin ja 24 tunnin jälkeen 45 %:iin. [37, s. 83] Kitkalaakeroinnin etuna on pienet häviöt, mutta se on malliltaan monimutkainen ja vaatii voitelua. Ilma- ja kalvolaakerit toimivat suoraan roottorissa, mutta ilmalaakeri laajenee ja vaatii kompensointia ja kalvolaakeri puolestaan vaatii tasaisen roottorin ulkopinnan.

Parhaiten laakerointihäviöitä poistaa magneettisten laakereiden käyttö. [18] Ne estävät vauhtipyörässä paikallaan pysyvien ja pyörivien osien kontaktin ja näin ollen vähentää kitkaa [78]. Suprajohtavuutta hyödyntämällä magneettisen laakeroinnin yhteydessä saadaan aikaan energiatihedeltään SMES-järjestelmää korkeampi energiavarasto. Suprajohteisten sekä magneettisten laakereiden ongelmana on kuitenkin kallis hinta sekä niihin liittyvän tekniikan kehittymättömyys. Perinteisempään teknologiaan nojautuva vauhtipyörätekniikka on ominaisteho- ja energia-arvoiltaan samaa luokkaa kuin lyijyakut. [18]

Yksi vauhtipyörän eduista on se, että pyörimisenergia on helppo muuttaa sähköksi tai mekaaniseksi työksi [4]. Vauhtipyörän energia voidaan ladata ja purkaa nopeasti. Ne vaativat lisäksi vähemmän huoltoa kuin akut, ja niillä on jopa 20 vuoden käyttöikä, joka ei lyhene syväpurkauksesta. [79] Akkuihin verrattuna vauhtipyörät ovat lisäksi ympäristöystävällisiä, sillä niihin ei liity kemikaaleja tai hävityskysymyksiä [50].

Vauhtipyörän mahdollinen vikaantuminen aiheuttaa kuitenkin merkittäviä turvallisuusriskejä. Näitä ovat esimerkiksi vauhtipyörän sinkoaminen kotelostaan, murtuminen sekä energiavaraston purkautuminen sekunnin murto-osassa. Turvallisuusriskeihin varaudutaan muun muassa rajoittamalla pyörimisnopeuksia sekä sijoittamalla joissain sovelluksissa vauhtipyörä maan alle. [18] Vauhtipyörän varastointikapasiteetti on lisäksi pieni verrattuna sen painoon ja kustannuksiin [37, s. 78]. Vauhtipyörien hankintakustannukset ovat korkeat, jopa 2–5 -kertaiset vastaavanlaiseen akkujärjestelmään verrattuna. Lisäksi perinteiseen teknologiaan perustuvien vauhtipyörien energiahäviöt ovat kohtuullisen suuret. [18]

Vauhtipyörien on ennustettu saavuttavan suurin kaupallinen menestys jopa 1 MW sovelluksissa. Tulevaisuudessa korkean lämpötilan suprajohteiden kehittyessä voidaan suprajohtetekniikalla parantaa vauhtipyörien laakerointia, mikä mahdollistaisi vauhtipyörien laajamittaiset sovellukset ja parantaisi hyötysuhdetta. Vauhtipyöriä voitaisiin käyttää esimerkiksi parantamaan sähköverkkojen luotettavuutta. [79]

5. YHTEENVETO

Suuren mittakaavat varastoja tullaan tarvitsemaan tulevaisuudessa yhä enemmän uusiutuvien energialähteiden epätasaisen tuotannon vuoksi. Tähän mennessä suuret energiamäärät on pääasiassa varastoitu pumppuvoimaloihin. Niiden rakentamista rajoittaa vaatimukset tietynlaisesta ympäristöstä. Vaihtoehtoihin varastoihin kuten paineilmavarastoihin ja akustoihin on tehtävä vielä kehitystä kapasiteetin ja hyötysuhteen osalta, jotta niihin on mahdollista varastoida yhtä suuria määriä energiaa. Paineilmavaraston varastointiprosessista pyritään parhaillaan tekemään adiabaattinen, sillä hukkaenergian talteenotolla on suuri merkitys paineilmavaraston hyötysuhteeseen.

Kasvava kiinnostus energialähteiden ympäristöystävällisyyteen näkyy myös autoteollisuudessa. Energiavarastoista superkondensaattorit ja vetypolttokennot ovat tulevaisuuden autoteknologiaa. Vaikka vetypolttokennot tuottavatkin palaessaan vain vettä, on hiilidioksidipäästöjen kannalta ongelmana yhä vedyn yleisin valmistustapa eli maakaasun reformointi. Reformoinnin hiilidioksidipäästöjä vähentäisi hiilidioksidin talteenotto. Kyseessä on kuitenkin vielä kehitteillä oleva tekniikka. Täysin hiilivapaa vetyvarastointi vaatisi vedyn erottamisen yhdisteestä uusiutuvasti tuotetulla sähköenergialla. Paineistetun vedyn turvallinen säilytys on lisäksi varmistettava ennen kuin polttokennot voivat täysin yleistyä autoissa.

Sähkömagneettinen energiavarasto on hyötysuhteeltaan erittäin hyvä ja teoriassa ideaalinen energiavarasto. Eniten varaston yleistymistä jarruttavat kylmän toimintalämpötilan aiheuttamat haasteet ja varaston kustannukset. SMES-järjestelmiin kohdistuva kehitys liittyykin pääosin toimintalämpötilan nostattamiseen. Suprajohteisiin liittyvän tekniikan kehittyessä voidaan sen avulla lisäksi parantaa vauhtipyörien laakerointia, jonka myötä kitkan aiheuttamat energiahäviöt pienenisivät vauhtipyörävarastoinnissa.

LÄHTEET

- [1] Global energy demand rose by 2.3 % in 2018, its fastest pace in the last decade, International Energy Agency, 2019, Viitattu 9.6.2019. Saatavissa: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/march/global-energy-demand-rose-by-23-in-2018-its-fastest-pace-in-the-last-decade.html>
- [2] Rising energy demand and the energy gap, Edexcel International GCSE Geography, 2015, Viitattu 9.6.2019. Saatavissa: <https://maxwatsongeo-raphy.wordpress.com/section-b/economic-activity-and-energy/rising-energy-demands-and-the-energy-gap/>
- [3] R. Hadizadeh, A. Shojaie, A. Shahabi, Strategies for energy pricing to modify energy consumption using reward process functions, 2017, Viitattu 9.6.2019. Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23815639.2017.1310637>
- [4] R. Kara, Energian varastointi, Suomen sähköurakoitsijaliitto ry, 1987
- [5] Homes show greatest seasonal variation in electricity use, U.S. Energy Information Administration, 2013, Viitattu 14.6. Saatavissa: <https://www.eia.gov/to-dayinenergy/detail.php?id=10211>
- [6] Energiavuosi 2018, Energiateollisuus, Viitattu 11.8.2019. Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energia-vuosi_2018_-_sahko.html
- [7] Sähkön kulutus ja tuotanto, Fingrid. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahko-markkinat/kulutus-ja-tuotanto/>
- [8] C. Gavin, Seasonal variations in electricity demand, 2014. Saatavissa: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/295225/Seasonal_variations_in_electricity_demand.pdf
- [9] Sähkön kulutus Suomessa, Fingrid. Kuvaajan aineisto saatavissa: https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected_datasets=124
- [10] D. Pavlov, G. Papazov, M. Gerganska, Battery Energy Storage Systems, 1991
- [11] Tuulitilastot, Ilmatieteenlaitos, Viitattu 14.6.2019. Saatavissa: <https://ilmatieteen-laitos.fi/tuulitilastot>
- [12] Tuulivoimatuotanto, Suomen Tuulivoimayhdistys, Viitattu 14.6.2019. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto>
- [13] Kysyntäjousto, Fingrid, Viitattu 28.7.2019. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>
- [14] T. Kovarik, C. Pipher, J. Hurst, Wind energy, the generation, storage and conversion of wind power for practical use today, 1979

- [15] Batteries, an important part of a fossil-free energy system, Vattenfall, 2019, Viitattu 17.8.2019. Saatavissa: <https://group.vattenfall.com/press-and-media/news-press-releases/newsroom/2019/batteries-an-important-part-of-a-fossil-free-energy-system>
- [16] Wind and Li-ion energy storage on the Faroe Islands, Saft, 2018, Viitattu 17.8.2019. Saatavissa: <https://d1jikt90t87hr.cloudfront.net/449/wp-content/uploads/sites/2/2018/06/Romain-Gouttefangeas-Wind-and-Li-ion-energy-storage-on-the-Faroe-Islands.pdf>
- [17] Short term energy storage systems, Paul Scherrer Institut, Viitattu 1.7.2019. Saatavissa: <https://www.psi.ch/en/enefficient/short-term-energy-storage-systems>
- [18] R. Alanen, T. Koljonen, S. Hukari, P. Saari, Energian varastoinnin nykytila, VTT, Viitattu 27.7.2019. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>
- [19] Characteristics and Technologies for Long-vs. Short-term Energy Storage, Sandia National Laboratories, 2001. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.548.4507&rep=rep1&type=pdf>
- [20] Pumped Hydro Storage – The Ups and Downs of Water, Alternative Energy Tutorials, Viitattu 1.7.2019. Saatavissa: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/pumped-hydro-storage.html>
- [21] The world's water battery: Pumped hydropower storage and the clean energy transition, International Hydropower Association, 2018, Viitattu 1.7.2019. Saatavissa: <https://www.hydropower.org/publications/the-world's-water-battery-pumped-hydropower-storage-and-the-clean-energy-transition>
- [22] B. Sørensen, Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage, 2007. Saatavissa: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpRECTS003/viewer-Type:toc/root_slug:renewable-energy-conversion?kpromoter=marc
- [23] Pumped Hydroelectric Storage, Energy Storage Association, Viitattu 20.7.2019. Saatavissa: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/pumped-hydroelectric-storage>
- [24] D. Vaughan, N. West, Batteries vs pumped storage hydropower – a place for both?, Renew Economy, 2017, Viitattu 4.9.2019. Saatavissa: <https://reneweconomy.com.au/batteries-vs-pumped-storage-hydropower-place-87554/>
- [25] DOE Promotes Pumped as Option for Renewable Power Storage, The New York Times, 2010, Viitattu 20.7.2019. Saatavissa: <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/gwire/2010/10/15/15greenwire-doe-promotes-pumped-hydro-as-option-for-renewable-51805.html>
- [26] Environmental performance of existing energy storage installations, stoRE, 2012. Saatavissa: https://www.stoRE-project.eu/documents/results/en_GB/environmental-performance-of-existing-energy-storage-installations

- [27] Batteries vs. pumped hydro – are they sustainable?, Entura, 2017, Viitattu 16.8.2019. Saatavissa: <http://www.entura.com.au/batteries-vs-pumped-storage-hydropower-are-they-sustainable/>
- [28] Pumped storage hydro-electric project technical guide, Federal Energy Regulatory Commission, 2007. Saatavissa: https://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/initiatives/PS_Tech_Guidance_Oct07.pdf
- [29] Bath County Pumped Storage Station, Dominion Energy, Viitattu 16.8.2019. Saatavissa: <https://www.dominionenergy.com/company/making-energy/renewable-generation/water/bath-county-pumped-storage-station>
- [30] A Review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets, Loughborough University, 2016. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.019>
- [31] Vaarunvuorten historia ja nähtävyydet, Luontoon.fi, Viitattu 16.8.2019. Saatavissa: <https://www.luontoon.fi/vaarunvuoret/historiajanahtavydet>
- [32] Toteutuuko Pyhäsalmen kaivoksen energiavarasto?, Energiatalous, 2018, Viitattu 16.8.2019. Saatavissa: <https://www.energiatalous.fi/?p=1931>
- [33] D. Wold, Methods for Design and Application of Adiabatic Compressed Air Energy Storage Based on Dynamic Modeling, 2010.
- [34] IRENA (International Renewable Energy Agency), Electricity storage and renewables: Cost and markets to 2030, 2017. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
- [35] CAES...an alternative to pumped hydro?, Watt-logic, 2016, Viitattu 11.8.2019. Saatavissa: <http://watt-logic.com/2016/06/27/caes/>
- [36] M. Budt, D. Wolf, R. Span, J. Yan, A Review on Compressed Energy Storage: Basic principles, past milestones and recent developments, 2016. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916302641?via%3Dihub>
- [37] A. Ter-Gazarian, Energy storage for power systems (2nd edition), 2011. Saatavissa: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpESPSE001/viewer-Type:toc/root_slug:energy-storage-for?kpromoter=marc
- [38] S. Zhou, J. Zhang, W. Song, Z. Feng, Comparison Analysis of Different Compressed Air Energy Storage Systems, 2018. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.075>
- [39] Overview of current development on compressed air energy storage, European Energy Research Alliance (EERA), 2013. Saatavissa: https://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/Overview-of-Current-Development-on-Compressed-Air-Energy-Storage_EERA-report-2013.pdf
- [40] Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids, International Energy Agency, 2009. Saatavissa: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_storage.pdf

- [41] Compressed air energy storage power plants, BINE, 2007. Saatavissa: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0507_engl_internetx.pdf
- [42] A Storage Solution Is in the Air, New York Times, 2012, Viitattu 21.7.2019. Saatavissa: <https://www.nytimes.com/2012/10/02/business/energy-environment/a-storage-solution-is-in-the-air.html?pagewanted=all>
- [43] Ditch the batteries: Off-Grid Compressed Air Energy Storage, Low-tech Magazine, 2018, Viitattu 27.7.2019. Saatavissa: <https://www.lowtechmaga-zine.com/2018/05/ditch-the-batteries-off-the-grid-compressed-air-energy-storage.html>
- [44] Overview of Compressed Air Energy Storage And Technology Development, MDPI, 2017. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/991/pdf>
- [45] I. Arsie, V. Marano, M. Moran, G. Savino, G. Rizzo, Optimal Management of a Wind/CAES Power Plant By Means of Natural Network Wind Speed Forecast, 2007. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/228375333_Optimal_Management_of_a_WindCAES_Power_Plant_by_Means_of_Neural_Network_Wind_Speed_Forecast
- [46] V. Kühn, EnergieWinde, Der Exort der Energiewende, 2017, Viitattu 1.9.2019. Saatavissa: <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/druckluftspeicher-huntorf-der-energiewende-exot>
- [47] J. Yan, Handbook of clean energy systems, 2002.
- [48] Circuit Globe, Lead Acid Battery, Viitattu 1.9.2019. Saatavissa: <https://circuit-globe.com/lead-acid-battery.html>
- [49] N. Omar, M. Daowd, P. Van der Bossche, J. Van Mierlo, O. Hegazy, J. Smen-kens, T. Coosemans, Recharchable Energy Storage Systems for Plug-in Hybrid Electric Vehicles -Assessment of Electrical Charasteristics, 2012, Viitattu 3.9.2019. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/231169804_Re-chargeable_Energy_Storage_Systems_for_Plug-in_Hybrid_Electric_Vehicles-Assessment_of_Electrical_Characteristics
- [50] P. Kokkotis, C. Psomopoulos, G.C. Ioannidis, S.D. Kaminaris, Enviromental As-pects of Small Scale Energy Storage Systems, 2015. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/278727190_Environmental_As-pects_of_Small_Scale_Energy_Storage_Systems
- [51] J.Osara, M. Bryant, A Thermodynamic Model for Lithium-Ion Battery Degrada-tion Application of the Degradation-Entropy Generation Theorem, 2019. Saata-vissa: https://www.researchgate.net/publication/332192992_A_Thermodyna-mic_Model_for_Lithium-Ion_Battery_Degradation_Application_of_the_Degrada-tion-Entropy_Generation_Theorem
- [52] ProgressiveRC, ESR Meter Instructions. Saatavissa: <http://www.progressiv-erc.com/media/ESR%20Meter%20Instructions.pdf>
- [53] STEK, Sähköenergian varastointi, Viitattu 31.8.2019. Saatavissa: <https://stek.fi/perustietoa-sahkosta/sahkoenergian-varastointi/>

- [54] Hornsdale Power Reserve, Overview. Viitattu 31.8.2019. Saatavissa: <https://hornsdalepowerreserve.com.au/overview/>
- [55] Power magazine, FPL Will Build World's Largest Battery Storage System, 2019. Viitattu 1.9.2019. Saatavissa: <https://www.powermag.com/fpl-will-build-worlds-largest-battery-storage-system/>
- [56] Energy Storage, Capacitor Guide, Viitattu 28.7.2019. Saatavissa: <http://www.capacitorguide.com/energy-storage/>
- [57] Electronics Tutorials, Capacitor, Viitattu 29.8.2019. Saatavissa: https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap_1.html
- [58] Uses of Capacitors, Techwalla, Viitattu 28.7.2019. Saatavissa: <https://www.techwalla.com/articles/uses-capacitors>
- [59] Non-Ideal Properties of Capacitors, Digi-Key Corporation, 2014, Viitattu 28.7.2019. Saatavissa: <https://www.digikey.com/eewiki/display/Motley/Non-Ideal+Properties+of+Capacitors>
- [60] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, 2008
- [61] Encyclopaedia Britannica, Meissner Effect, Viitattu 30.8.2019. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/Meissner-effect>
- [62] Electrical4U, Comparison of Type-I and Type-II Superconductors, 2019, Viitattu 30.8.2019. Saatavissa: <https://www.electrical4u.com/comparison-of-type-i-and-type-ii-superconductors/>
- [63] N. Kumar, Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System, 2015, Viitattu 27.7.2019. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/261204920_Superconducting_Magnetic_Energy_Storage_SMES_System
- [64] Semantic Scholar, Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective, 2008, Viitattu 28.7.2019. Saatavissa: <https://www.semanticscholar.org/paper/Superconducting-Magnetic-Energy-Storage%3A-Status-and-Tixador/a7ee2437ff72c883dbf7dc4825b158e77c686bf0>
- [65] What Separates Toroidal Coil Transformers from Other Transformers?, Custom Coils, 2017, Viitattu 28.7.2019. Saatavissa: <https://www.custom-coils.com/blog/what-separates-toroidal-coil-transformers-from-the-other-transformers/>
- [66] An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010. Saatavissa: <https://paginas.fe.up.pt/~ee04109/Documentos%20e%20imagens/51%20-%20An%20Overview%20of%20SMES%20Applications%20in%20Power%20and.pdf>
- [67] C. Polk, R. W. Boom, Environmental Impact of Magnetic Fields Generated by A Large Superconductive Magnetic Energy Storage (SMES) System, 1986, Viitattu 3.9.2019. Saatavissa: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-2213-9_14

- [68] A. Friedman, N. Shaked, E. Perel, M. Sinvani, Y. Wolfus, Y. Yeshurun, Superconducting magnetic energy storage device operating at liquid nitrogen temperatures, 1998. Saatavissa: https://superconductivity.biu.ac.il/files/superconductivity/shared/katz_1999_1-s2.0-s001122759800126x-main.pdf
- [69] P. Kauranen, J. Solin, K. Törrönen, J. Koivula, J. Laurikko, Vetytiekartta – Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle, VTT, 2013. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2013/VTT-R-02257-13.pdf>
- [70] Alternative Fuels Data Center, Hydrogen Production, Viitattu 30.8.2019. Saatavissa: https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html
- [71] Motiva, Vety, 2019. Viitattu 31.8.2019. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_vii-saasti/energialahteet/vety
- [72] A. Godula-Jopek, W. Jehle, J. Wellniz, Hydrogen Storage Technologies (2nd Edition). Wiley, 2012.
- [73] H. Dagdougui, R. Sacile, C. Bersani, A. Ouammi, Hydrogen Storage and Distribution: Implementation Scenarios, 2018. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128120361000044>
- [74] R. Leino, Polttokennoja on moneen käyttöön, Tekniikka & Talous, 2004, Viitattu 31.8.2019. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/polttokennoja-on-moneen-kayttoon/9d449747-0f19-3f93-b05e-da27b35e4a67>
- [75] F. Khan, A. Nawaz, M. Muhammad, M. Ali, Review and Analysis on MATLAB Simulink Model of PEM Fuel Cell Stack, 2013. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/274055865_Review_And_Analysis_Of_MAT-LABR_Simulink_Model_Of_PEM_Fuel_Cell_Stack/figure?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic
- [76] J. Aarnio, K. Leiviskä, Vetypolttokennojen dynaamiset mallit, 2018, Oulun yliopisto, Säättötekniikan laboratorio. Saatavissa: <https://www oulu.fi/sites/default/files/content/bno067.pdf>
- [77] J. Larminie, A. Dicks, Fuel cell systems explained. 2nd ed. Chichester 2003
- [78] F. DeLattre, Renewable Energy: Flywheels for Backup Power, Facility Executive, 2014, Viitattu 18.8.2019. Saatavissa: <https://facilityexecutive.com/2014/12/flywheels-for-backup-power/>
- [79] M.G. Molina, Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications, 2010. Viitattu 30.8.2019. Saatavissa: <https://www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/dynamic-modelling-andcontrol-design-of-advanced-energy-storage-for-power-system-applications>
- [80] Ajisman, K. Yamagata, J. Kobuchi, R. Shimada, Study for Cooling Gases for Windage Loss Reduction, 2000. Saatavissa: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejpes1990/120/3/120_3_478/pdf